

量子信息技术发展与应用研究报告

（2020 年）

中国信息通信研究院

2020年12月

前 言

2020 年 10 月 16 日，中共中央政治局就量子科技研究和应用前景举行第二十四次集体学习。习近平总书记发表重要讲话，为当前和今后一个时期我国量子科技发展做出重要战略谋划和系统布局。以量子计算、量子通信和量子测量为代表的量子信息技术作为量子科技领域的重要组成部分，将为推动基础科学研究探索、信息通信技术演进和数字经济产业发展注入新动能。

近年来，量子信息技术已经成为全球各主要国家在科技领域关注的焦点之一，规划布局和投资支持力度进一步加大，量子计算、量子通信和量子测量三大领域科研探索和技术创新保持活跃，代表性研究成果和应用探索进展亮点纷呈、前景可期，在前沿科技领域和信息通信行业受到广泛关注和讨论。我国量子信息技术领域具备良好的研究与应用实践基础，三大领域总体发展态势良好，未来有望进一步取得更多技术研究与应用探索的新成果。

在连续两年发布研究报告的基础上，中国信息通信研究院深入学习领会和贯彻落实习近平总书记重要指示精神，进一步加强研究并组织编写了《量子信息技术发展与应用研究报告》（2020 年），对量子信息技术总体发展态势，三大领域关键技术、应用进展和热点问题，以及技术演进和应用前景等进行分析探讨，供业界参考。



目　录


CAICT 中国信通院

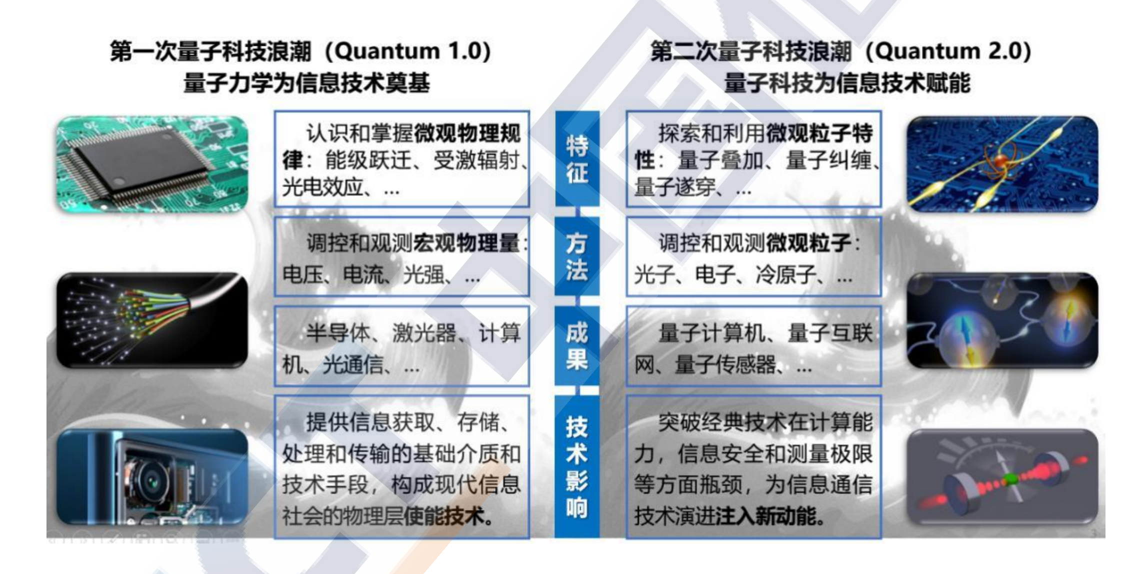
图 目 录



一、量子信息技术总体发展态势

（一）量子科技将为信息技术发展演进注入新动能

二十世纪量子力学的创立和发展引发第一次量子科技革命浪潮，以认识和掌握微观物理现象和规律，调控和观测宏观物理量为主要特征，诞生了以半导体、激光器、计算机和光通信等为代表的信息通信技术，提供了信息获取、存储、处理和传输的基础介质和解决方案，形成了现代信息社会的物理层使能技术，成为推动经济社会发展变革的先进生产力，如图 1 所示。



来源：中国信息通信研究院

图 1 量子科技浪潮与信息技术发展演进

进入二十一世纪，随着人类对微观世界认识理解的深入和观测调控能力的提升，以操控光子、电子和冷原子等人造量子体系，利用量子叠加、纠缠和隧穿等独特微观物理现象为主要特征的第二次量子科技革命浪潮将至。以量子计算、量子通信和量子测量为代表的量子信息技术的研究和应用探索，未来有望突破计算处理能力、信息安全保

障和测量精度极限等方面的难题和瓶颈，成为推动基础科学研究探索、信息通信技术演进和数字经济产业发展的新动能。

量子计算以量子比特为基本单元，利用量子叠加和干涉等原理实现并行计算，能够在某些计算困难问题上提供指数级加速，是未来计算能力跨越式发展的重要方向。2019 年 Google 报道取得了“量子优越性”实验的突破性成果，成为量子计算领域发展的标志性事件，也刺激了全球科技巨头和初创企业的进一步投入与竞争，有望加速量子计算技术研究和应用探索的发展。基于含噪声中等规模量子（NISQ）处理器和云接入等方式，在生物化学、大数据优化和机器学习等计算场景中探索“杀手级应用”将是近期的主要发展目标。可扩展可容错量子计算需要物理平台、纠错编码算法和调控系统等方面的进一步突破，仍是需要十年以上艰苦努力的远期目标。

量子通信利用量子叠加态及纠缠效应，在经典通信辅助下，进行量子态信息传输或密钥分发，在理论协议层面具有无法被窃听的信息论安全性保证。量子通信的主要应用包括量子隐形传态（QT）、量子密钥分发（QKD）、量子安全直接通信、量子秘密共享和量子密集编码等方向。从研究论文数量和专利申请情况分析，QKD 和 QT 是量子通信研究与应用发展的重点方向。基于 QKD 的量子保密通信是目前已经初步实用化的应用方向，应用和产业探索逐步展开，各方对应用前景的观点尚未统一。基于 QT 构建量子信息网络是未来量子通信研究与应用探索的重要方向，近期欧美大力布局规划推动研究与实验，但距离实用化仍有很长距离。

量子测量通过微观粒子系统调控和观测实现物理量测量，在精度、灵敏度和稳定性等方面比传统测量技术有数量级提升，主要冷原子相干叠加测量、核磁/顺磁共振测量、无自旋交换弛豫原子自旋（SERF）测量、纠缠态/压缩态测量和量子增强测量等技术方向，可用于包括时间基准、惯性测量、重力测量、磁场测量和目标识别等应用场景，在航空航天、防务装备、地质勘测、基础科研和生物医疗等领域应用前景广泛。在新一代定位、导航和授时系统，磁场和重力场高灵敏度监测系统和高精度目标识别系统等方向有望率先获得突破和应用。

（二）全球量子信息领域进一步规划布局加大投入

量子信息技术具有重要科学与应用价值，可能引发对传统信息技术体系产生冲击和重构的颠覆性技术创新，并对信息通信技术演进和产业发展产生重要驱动作用。近年来，各主要国家纷纷在量子信息技术领域加强布局规划并进一步加大支持投入力度，推出发展战略和研究应用项目规划，公开的相关项目规划和投资情况如图 2 所示。

国家	时间	项目规划	投资(亿美元)
英国	2014	国家量子技术计划（一期）	≈3.52
欧盟	2016	"量子宣言"旗舰计划	≈11.12
美国	2018	国家量子行动计划（NQI）立法	12.75
德国	2018	量子技术—从基础到市场	≈7.23
英国	2019	国家量子技术计划（二期）	≈3.03
日本	2019	量子技术创新战略	≈2.76
俄罗斯	2019	量子技术基础与应用研究	≈7.90
印度	2020	量子技术与量子计算机研发	≈11.14
以色列	2020	未来5年量子技术投资计划	≈0.27
法国	2020	量子技术国家战略（议会议案）	—
美国	2020	量子网络基础设施（QNI）法案	1

来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理（截至 2020 年 10 月）

图 2 全球量子信息领域项目规划和投资情况[1]

[1] 表格中的投资规模为横向可比性，统一按照美元计价呈现，汇率波动可能导致具体数值变化。

量子信息技术研究与应用，有望成为未来重大技术创新“动力源”和“助推器”，已成为全球人类科技的共同探索与关注焦点之一。在各国发展规划和项目布局中，量子计算、量子通信和量子测量等重点技术方向已形成普遍共识。针对三大领域的不同发展阶段、技术成熟度和应用前景，以分领域和分阶段方式，对前沿研究、应用探索、创业转化、产业推动和人才培养等方面进行综合规划布局和长期滚动投入也是各国在量子信息领域布局规划的通行做法。

美国国会 2018 年通过《国家量子行动计划》立法[2]，预计五年投资 12.75 亿美元支持量子科技研究与应用，白宫成立国家量子协调办公室（NQCO），发布《量子信息科学国家战略概述》[3]，对美国量子科技领域发展战略进行规划。2019 年以来，能源部（DoE）、国防部（DoD）、国家技术标准局（NIST）、国家科学基金会（NSF）等部门密集组织开展量子信息各领域调研并相继发布《量子计算：进展与前景》[4]、《量子模拟：架构与机遇》[5]、《量子前沿报告》[6]等十余项科学与技术报告，对量子计算、量子模拟、量子通信、量子精密测量和抗量子计算加密等各领域的发展现状、研究目标、路线图和应用产业发展路径等进行深入研讨和具体规划。2020 年 8 月公布的《人工智能与量子信息科学研发总结：2020-2021 财年》[7]报告显示，2020 年量子信息科学领域预算申请为 4.35 亿美元，实际执行为 5.79 亿美元，

[2]https://www.congress.gov/115/bills/hr6227/BILLS-115hr6227enr.pdf.
[3]https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2018/09/National-Strategic-Overview-for-Quantum-Information-Science.pdf
[4]https://www.nap.edu/catalog/25196/quantum-computing-progress-and-prospects
[5]https://arxiv.org/pdf/1912.06938.pdf
[6]https://www.quantum.gov/wp-content/uploads/2020/10/QuantumFrontiers.pdf
[7]https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2017/12/Artificial-Intelligence-Quantum-Information-Science-R-D-Summary-August-2020.pdf

2021 年预算申请额度进一步提升至 6.99 亿美元，预计总体投资规模将大幅超出原有法案计划。同期，美国能源部宣布建设由其下属国家实验室牵头的五大联合研究中心，包括：下一代量子科学与工程中心（Q-NEXT）、量子优势协同设计中心（C²QA）、超导量子材料和系统中心（SQMS）、量子系统加速器（QSA）和量子科学中心（QSC）。9 月，白宫科学技术政策办公室成立国家量子计划咨询委员会（NQIAC），国家技术标准局牵头成立量子经济发展联盟（QED-C），聚集管理部门、研究机构、科技企业、行业巨头和初创企业等相关方，开展量子信息科学研究、应用、产业和标准等方面协调与合作，帮助构建供应链，支持量子产业发展。

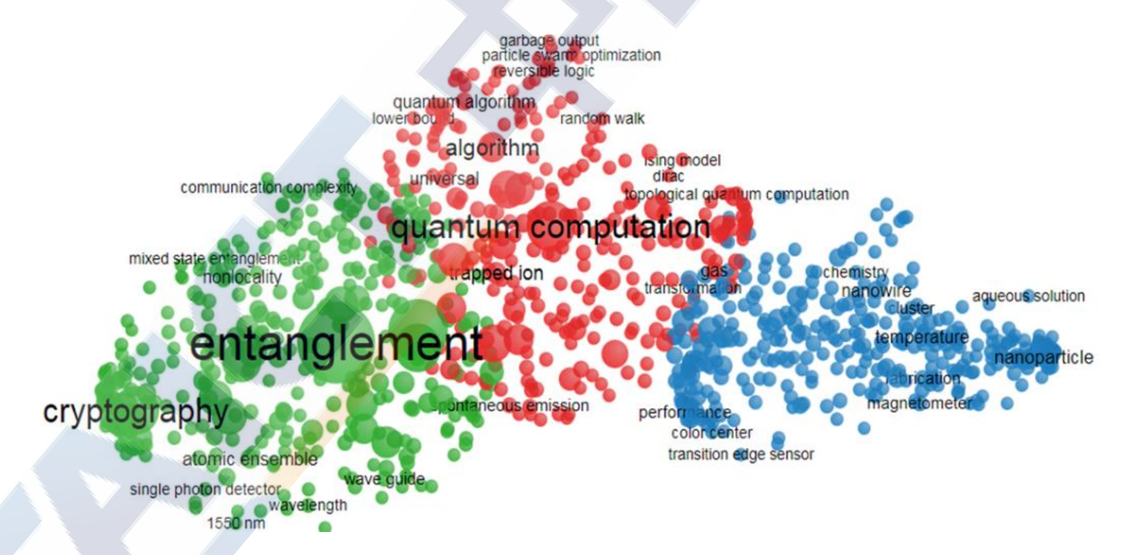
我国对量子信息技术的基础研究、科学实验、示范应用、网络建设和产业培育一直高度重视。科技部和中科院通过自然科学基金、“863”计划、“973”计划、国家重点研发计划和战略先导专项等多项科技项目，对量子信息基础科研应用探索进行支持。发改委牵头组织实施量子保密通信“京沪干线”，国家广域量子保密通信骨干网等试点项目和网络建设。工信部组织开展量子保密通信应用与产业研究，支持和引导量子信息技术的标准化研究和产学研协同创新。

2020 年 10 月 16 日，中共中央政治局就量子科技研究和应用前景举行第二十四次集体学习，习近平总书记发表重要讲话，为当前和今后一个时期的我国量子科技发展做出重要战略谋划和系统布局。讲话充分肯定了我国科技工作者在量子科技领域取得的重大创新成果，也指出未来发展面临的短板、风险和挑战。讲话从发展趋势研判，顶

层设计规划，政策引导支持，人才培养激励，产学研协同创新等五个方面对我国量子科技发展做出全方位系统性布局，为把握大趋势，下好先手棋进一步指明了方向。11 月 3 日十九届五中全会发布的“十四五”规划建议中，进一步提出：瞄准人工智能、量子信息、集成电路、生命健康、脑科学、生物育种、空天科技、深地深海等前沿领域，实施一批具有前瞻性、战略性的国家重大科技项目。

（三）量子信息三大领域科研和技术创新保持活跃

量子信息技术已成为全球科研领域关注焦点之一。量子信息科研论文主要分布在物理学、光学和工程领域，同时与计算科学、化学、数学等领域也有较多关联，覆盖面广，交叉特点明显，其中，科研论文发表量排名前 20 名的高水平期刊汇聚了超过 45%的科研论文。

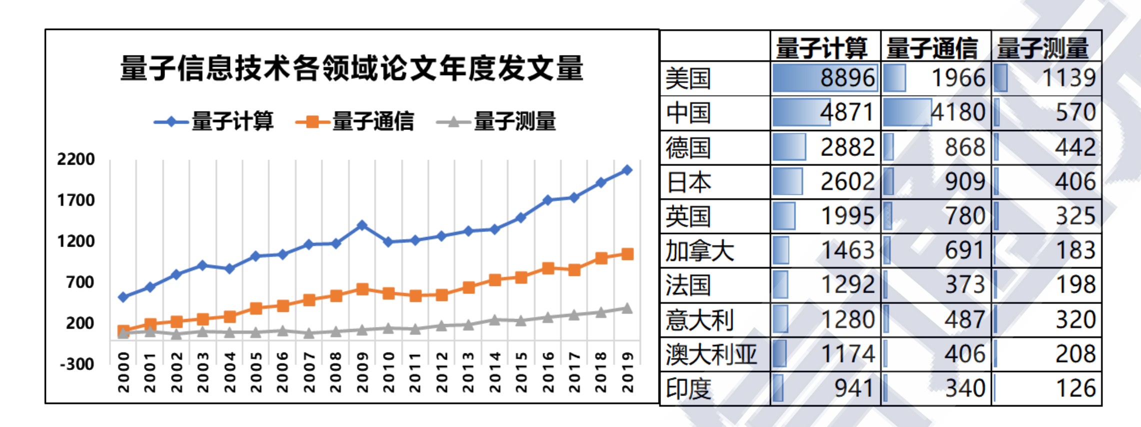


来源：中国信息通信研究院知识产权中心（检索时间 2020.10，检索库 WoS）

图 3 量子信息领域科研论文关键词聚类图

量子信息技术作为多学科交叉前沿领域，论文筛选和关键词聚类词云如图 3 所示，其中呈现出三个主要的聚簇，蓝色表示量子物理实现技术，绿色表示量子计算、通信和加密技术，红色则表示量子计算

和量子信息学，在红色和绿色交汇处包含量子测量。此外，量子退火、粒子群优化、可逆逻辑和单光子探测器等关键词位于词云的边缘，和量子计算和量子加密关系比较强，和其他主题关系较弱。

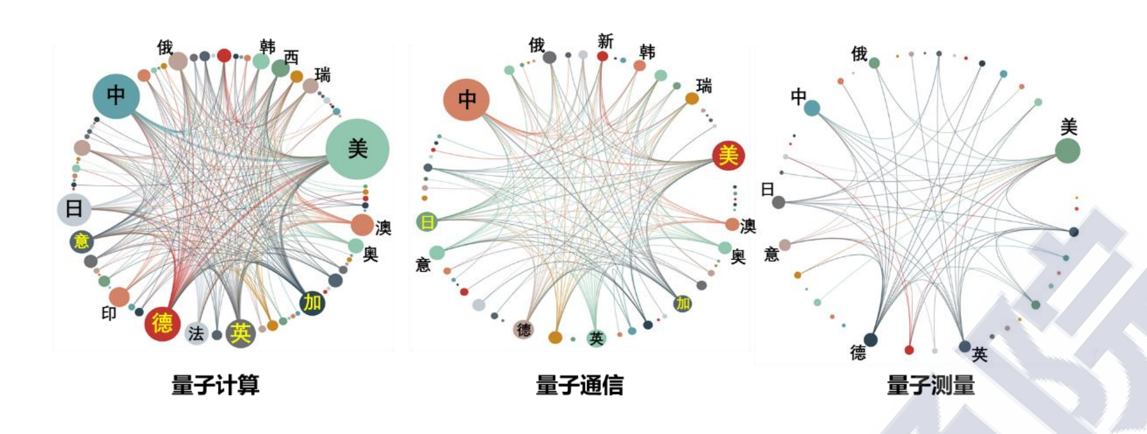


	量子计算	量子通信	量子测量
美国	8896	1966	1139
中国	4871	4180	570
德国	2882	868	442
日本	2602	909	406
英国	1995	780	325
加拿大	1463	691	183
法国	1292	373	198
意大利	1280	487	320
澳大利亚	1174	406	208
印度	941	340	126

来源：中国信息通信研究院知识产权中心（检索时间 2020.10，检索库 WoS）

图 4 量子信息技术三大领域全球年度科研论文量及国家排序

近年来，量子信息三大领域科研论文发文量持续上升，研究创新活跃，如图 4 所示。其中，量子计算上升趋势最明显，美国科研机构和企业的论文数量超过 8000 篇，位列第一，中国紧随其后超过 4000 篇，其次是德、日、英、加、法等，成为量子计算技术研究创新主要来源。量子通信领域，量子密钥分发（QKD）相关论文数量持续上升，量子隐形传态（QT）相关论文近年来数量相对保持平稳，或与其关键技术瓶颈仍未取得突破有一定关系。中国量子通信论文量位列第一，超过 4000 篇，其次是美、日、德、英、加、意、澳等国，在全球发文量前 25 中有 10 家是中国高校或科研单位。外国机构中，滑铁卢大学、新加坡国立大学、MIT、多伦多大学、日内瓦大学等有较多研究成果。量子测量论文量超过 4000 篇，美国科研机构发文量位列第一，中、德、日、英等国紧随其后。



来源：中国信息通信研究院知识产权中心（检索时间 2020.10，检索库 WoS）

图 5 量子信息技术三大领域全球科研论文合作网络

全球量子信息技术领域科研论文的合作网络如图 5 所示。其中，量子计算领域，美国与德国、加拿大和英国等国深化合作的趋势明显，我国中科院、中科大、清华等机构已位列全球量子计算发文量前 20 名，并与国际研究机构展开了较为广泛的合作，合作机构主要来自美国、加拿大和德国等国。量子通信领域，中国论文发表数量最高，并积极推动与加拿大和美国等国研究机构的合作。量子测量领域，美国加州理工和德国苏黎世联邦理工机构的论文数量较多，排名靠前，我国中科院和中科大等机构持续开展科研攻关，在论文发表数量方面开始逐步进入国际前沿行列。

（四）量子计算亮点成果纷呈，成为关注讨论焦点

量子处理器硬件研究取得多方突破，量子物理比特数量、质量及综合评价指标的记录频繁刷新，部分技术路线在物理材料和实现工艺方面也取得一定进展。量子物理比特数量方面，2020 年 9 月 IBM 发布路线图，预计 2023 年将实现超过 1000 位量子物理比特，之后向百万级量子物理比特迈近。量子物理比特保真度方面，澳大利亚初创公

司 SQC 于 2020 年 10 月报道实现硅量子点路线双量子物理比特 99.99%的超高保真度，打破了 Google 基于超导路线实现的 99.64%记录，距离实现量子纠错又前进一步。量子体积指标方面，在 IBM、Honeywell 和 IonQ 等公司的推动下，2020 年短短几个月内实现由 64 位到 128 位，甚至到 400 万位的突破式增长。在拓扑技术路线物理材料方面，2020 年 9 月微软与哥本哈根大学联合报道合作发现的新材料，有望用于拓扑量子物理比特实现。环境条件方面，2020 年 4 月 Intel 与 QuTech 联合报道基于自旋量子位的半导体量子处理器，可在 1.1K 温度实现单量子位和双量子位逻辑门，降低了工作环境要求。

量子计算软件呈现多元化发展态势，进入研究开发活跃期，在软件操作系统、模拟器软件与应用软件方面取得突破。2020 年 8 月，量子计算软件开发公司 Riverlane 的量子操作系统 Deltaflow.OS 在真实量子处理器硬件上成功试用，通过操作系统可将相同的量子软件在不同类型的量子处理器硬件上运行，加速软件开发进程。2020 年 5 月，阿里巴巴报道在其研发基于张量网络收缩的“太章”模拟器，实现对随机量子电路采样问题的计算模拟时间的五个数量级提速，还报道了 Fluxonium 超导量子处理器新型设计架构。2020 年 9 月，华为发布 HiQ 3.0 平台和新版量子化学模拟软件 HiQ Fermion，增加多个功能模块和量子多体模拟等场景，实现 30 位量子比特多种物理模型的量子变分算法基态求解，与现有公开文献相比性能得到提升。

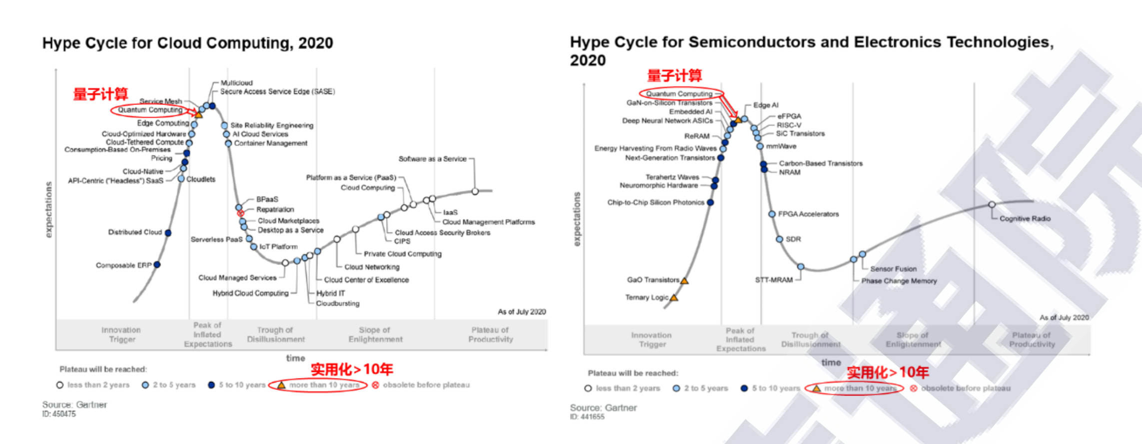
量子计算应用探索加速发展，对市场预期形成巨大激励，关注度和期望值不断提升。在量子化学模拟方面，2020 年 8 月 Google 在《科

学》报道实现大规模化学反应模拟的实验结果，通过使用量子设备对分子电子能量进行 Hartree-Fock 计算，并通过变分量子本征求解（VQE）进行纠错处理完善性能，实现对化学过程的计算预测，有望改善医学、制造等行业。在真实量子计算应用方面。9 月，剑桥量子计算公司（CQC）与 IBM 合作，提供真实量子计算的首个应用服务，可用于提供量子随机数生成用途，具有针对用户的集成验证功能。在专用量子计算机商用方面，D-Wave 公司 10 月发布新一代量子退火计算平台，以实现并加速量子退火计算应用程序的交付。

量子云计算成为量子计算服务主体，随着多方企业加入，目前竞争如火如荼。2020 年 8 月，云计算巨头 Amazon 上市 Braket 量子计算云平台，提供完全托管服务，用户可访问 D-Wave、IonQ、Rigetti 三家合作企业的后端硬件系统，进行量子算法运行、混合算法设计等工作。2020 年 9 月，加拿大初创公司 Xanadu 发布基于光学路线的量子云平台，可访问 8-Qubit 或 12-Qubit 的光量子计算机，成为继超导、离子阱、硅半导体技术路线之后，量子云计算后端实现的又一候选方案。2020 年 9 月，我国本源量子发布基于超导技术路线的量子计算云平台，后端搭载了具备 6 位量子物理比特的“夸父”芯片，为公众用户提供真实量子计算服务。同期，百度发布云原生量子计算平台“量易伏”，可通过云端对量子处理器硬件进行访问，也可通过模拟器运行 28 个量子比特的量子随机线路模型。阿里巴巴开源“太章”及“阿里云量子开发平台”（ACQDP），支持量子算法和硬件研发。

根据美国信息技术咨询公司 Gartner 于 2020 年 7 月发布的技术

成熟度周期曲线，如图 6 所示，量子计算技术正在接近“过高期望的顶峰”，但距离达到“生产力高原”仍有超过十年的距离。



来源：中国信息通信研究院根据 Gartner 公司公开信息整理

图 6 美国 Gartner 公司 2020 年技术成熟度周期曲线（含量子计算）

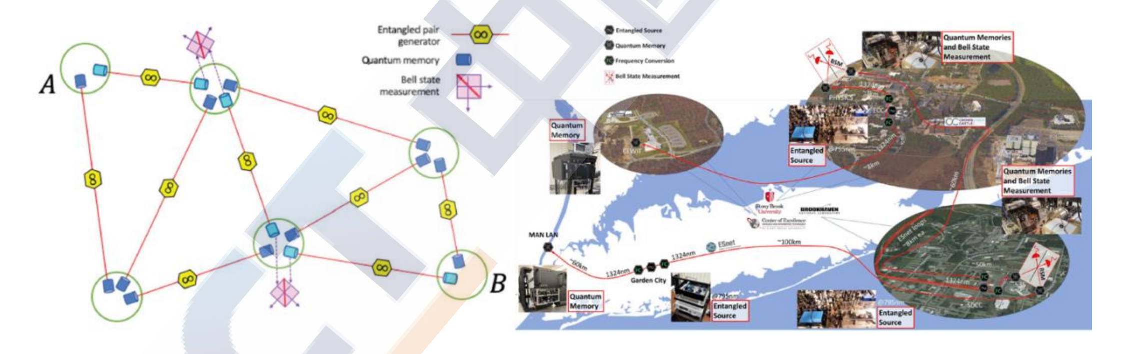
未来数年，如果基于当前可获得的中等规模含噪声量子处理器（NISQ）开展的实用化应用问题探索能够取得突破，则可以维持目前量子计算技术的投资、研究和关注热度，并可能进一步冲击更高目标，但如果实用化应用问题探索迟迟无法取得突破性进展，则存在进入过高期望破灭后的“幻灭之谷”的风险。

（五）量子信息网络成新热点，欧美加大力度推动

量子信息网络，也称量子互联网（Quantum Internet），基于量子通信技术产生、传输和使用量子态资源，实现量子计算机或量子传感器等量子信息处理系统或节点之间的互联和未知量子态信息的传输，可进一步提升量子信息传输和处理能力，已成为未来量子信息技术领域研究和应用探索的重要方向之一。

近年来，量子信息网络正逐步成为量子科技领域科研和应用探索的前沿热点，欧美等国均开展了相关布局规划和研究探索。2018 年

10 月，荷兰德尔福特理工在《科学》杂志发表量子互联网综述论文，对关键技术需求，网络能力演进和潜在应用场景做出预测。2019 年，美国国家科学基金会发布《量子系统互联（QuICs）研讨会》报告[8]，能源部发布《量子网络开放科学论坛》报告[9]，分析核心组件需求和技术挑战，并对未来研究发展目标和功能性能指标做出路线规划。2020 年 2 月，美国白宫发布《量子网络战略展望》报告[10]，提出未来五年推动量子存储中继，大容量量子信道和星地量子通信等关键技术突破，未来 20 年探索量子计算机互联并构建量子互联网。3 月，欧盟量子旗舰计划公布《战略研究议程》报告[11]，对未来十年量子信息网络研究提出目标规划。欧盟量子旗舰计划成立量子互联网联盟（QIA）项目，计划在荷兰建立首个四节点量子信息实验网。



来源：Report of the DOE Quantum Internet Blueprint Workshop 2020

图 7 美国能源部量子互联网蓝图论坛报告网络实验计划

2020 年 7 月，美国能源部公开了《量子互联网发展蓝图》研讨会报告[12]，对包括三大应用场景、四大研究方向和五项关键里程碑在内的量子互联网发展路线图做出规划。其中计划由布鲁克海文国家实验

[8] https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1912/1912.06642.pdf.
[9] https://info.ornl.gov/sites/publications/Files/Pub124247.pdf.
[10] https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2017/12/A-Strategic-Vision-for-Americas-Quantum-Networks-Feb-2020.pdf.
[11] https://qt.eu//app/uploads/2020/04/Strategic_Research-_Agenda_d_FINAL.pdf.
[12] https://www.osti.gov/servlets/purl/1638794

室牵头，在纽约地区建设首个量子中继网络实验线路，如图 7 所示，含三个纠缠源，六个室温运行量子存储器和两个纠缠交换站点。10 月，美国国会提出《量子网络基础设施》法案[13]，拟追加拨款一亿美元，推进量子网络基础设施建设并加速量子技术实施应用。国际互联网工程任务组（IETF）中的量子互联网提案研究组（QIRG），持续开展量子互联网原理框架、应用场景和组网协议等标准化讨论。

量子信息网络是实现各类量子信息系统互联，提升量子信息处理能力，探索全新组网应用模式和场景的物理载体和使能技术，未来可能在分布式量子计算，量子时间频率同步组网，量子观测计量组网等方面进一步提升运算处理能力和传感测量精度，或在复杂网络组网方面提供新型协议处理解决方案。虽然目前量子信息网络研究仍处于起步阶段，在使能组件、系统集成、网络架构、协议接口等方面尚需研究探索，潜在应用场景也尚未完全明确，距离实际应用落地仍有很长距离，但其所代表的量子计算、通信和测量相互融合的发展方向可谓是量子信息技术的终极演进目标。

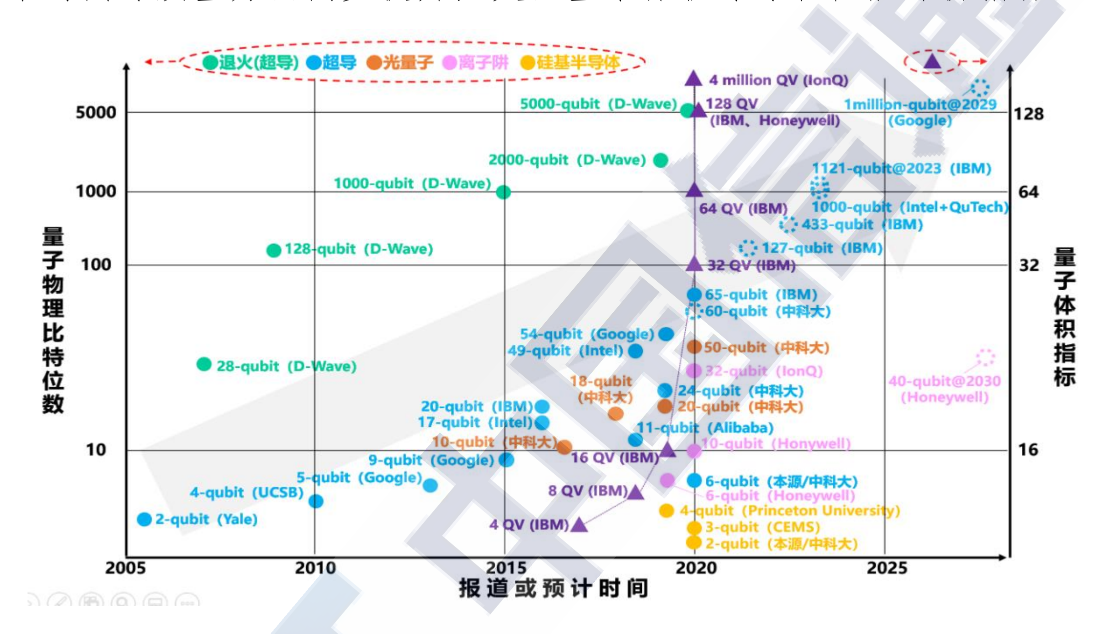
二、量子计算领域研究与应用进展

（一）物理平台仍处攻坚期，多条技术路线并行发展

量子处理器作为量子计算的“核心引擎”，其物理平台实现仍是当前阶段量子计算研究与应用的关键瓶颈之一，技术路线呈现多元化和并行发展态势，主流方案包含超导、离子阱、硅基半导体、光量子和

[13]https://zeldin.house.gov/sites/zeldin.house.gov/files/Quantum_01_xml.pdf.

拓扑等。近年来，量子计算处理器物理平台的技术研究和样机研制发展进一步加速，各技术路线的量子物理比特位数和量子体积指标的主要发展情况如图 8 所示，除拓扑路线之外，前四种技术路线均已实现量子物理比特，正在向实现可纠错的量子逻辑比特迈进。未来，业界或将不再单纯追求物理比特数量规模的扩展，而在逻辑门保真度、相干时间等质量方面同步提升，关注量子体积等综合性能评价指标。



来源：中国信息通信研究院公开材料整理（截至 2020 年 10 月）

图 8 量子计算处理器物理比特数和量子体积发展趋势

	退火（超导）	超导	离子阱	硅半导体	光量子
科技巨头		IBM Google intel amazon Alibaba Group	Honeywell	intel	
初创企业	D-Wave Qilimanjaro Quantum Tec	Rigetti IQM QCI Seeqc Oxford Quantum Circuits (OQC) Bleximo Alice&Bob 本源量子	IonQ Alpine Quantum Technologies Quantum Factory NextGenQ Oxford Ionics Universal Quantum 启科量子	Silicon Quantum Computing Quantum Motion Technologies Equal1.labs 本源量子	PsiQuantum Xanadu TundraSystems Global LTD Photonic Inc ORCA Computing

来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理（截至 2020 年 10 月）

图 9 量子计算物理平台方案技术路线与企业布局情况

部分科技巨头与初创企业量子计算硬件的布局投入情况如图 9 所示，超导和离子阱技术路线目前仍处于领先地位，受到关注程度最高，硅基半导体和光量子路线发展提速，但目前仍无任何一种路线能够完全满足实用化条件要求从而推动技术方案的融合收敛。

超导技术路线得到 Google 和 IBM 两大科技巨头加持，量子物理比特数量近年来稳步提升，IBM 近期公布 2023 年实现超 1000 位量子物理比特的愿景。超导路线可以借力先进集成电路加工工艺从而实现比特数量规模的快速扩展，但逻辑门保真度和相干时间方面存在一定短板，比特间连接的物理布线工艺难度要求将随着比特数增加而大幅提升，实现所有物理比特之间的全局纠缠联通将十分困难。此外，mK 温区的工作环境要求，将导致配套设备系统随比特数量的增长而出现更为严苛的工程化挑战。我国中科大、南方科大、中电科、阿里巴巴和本源量子等研究机构和公司在超导路线开展了研究和布局。

离子阱技术路线在物理比特质量和逻辑门保真度等方面具有一定优势，同时具备室温条件工作的优点，近年来 Honeywell 和 IonQ 等公司也在物理比特数量和量子体积指标等方面屡创新高，成为量子计算物理平台技术方案的另一个有力竞争者。2020 年 10 月，IonQ 公司报道仅依靠 32 位高质量全连接的量子物理比特即可实现四百万量子体积性能指标，将该指标直接推向指数增长区间。2020 年 11 月，美国 MIT 林肯实验室报道实现基于集成光学的离子阱处理芯片，同期 Honeywell 报道差异化量子电荷耦合离子阱 10 位全连接物理比特样机，计划 2030 年提升至 40 位。离子阱方案在真空工作环境要求，

门操作时间指标和激光读写操控复杂度等方面存在一定短板，单平台实现物理比特数量的大规模扩展也存在瓶颈。一种可能思路是通过多个中小规模的模块化平台，基于光子纠缠的传输和互联，实现模块级的物理比特数量扩展，而离子阱平台基于激光操控的光学方案也适用于实现此类量子信息系统之间的互联，乃至远距离传输构建所谓量子互联网。我国清华大学、中山大学和启科量子等研究机构和公司在离子阱路线有所布局和研究。

硅半导体技术路线与现代半导体集成电路工艺兼容，在可扩展性和可集成性等方面具有优势，Intel、TU Delft 和新南威尔士大学等公司和研究机构长期重点投入。近期研究包括推动硅基自旋方案和电荷方案融合，探索基于“纳米线”腔的量子互联总线，将双比特逻辑门保真度提升至 99.99%的实验报道，以及将环境工作温度提升至 1K 量级的实验成果等。但硅基半导体路线物理比特易受环境噪声影响且物理机制复杂，对于硅材料杂化制备工艺和测控技术要求较高，近年来在物理比特数量等指标方面暂无突破性提升。我国中科大和本源量子等研究机构和公司在硅半导体路线持续开展研究。

光量子技术路线在相干时间、室温工作、高维纠缠操控等方面具有优势，在实现量子信息系统互联方面也具有天然优势。我国中科大在光量子计算研究探索方面处于领先，近期报道实现 50 位光量子物理比特纠缠操控和玻色取样实验。但基于离散器件平台的光量子计算探索在比特数量大规模扩展方面将面临很大困难，基于光子集成的光量子芯片或将成为未来发展演进的重要方向，上海交大在该领域开展

了布局研究。美国初创公司 PsiQuantum 宣称有望数年内基于硅光集成实现拥有百万位量子物理比特的光量子计算机。



来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理

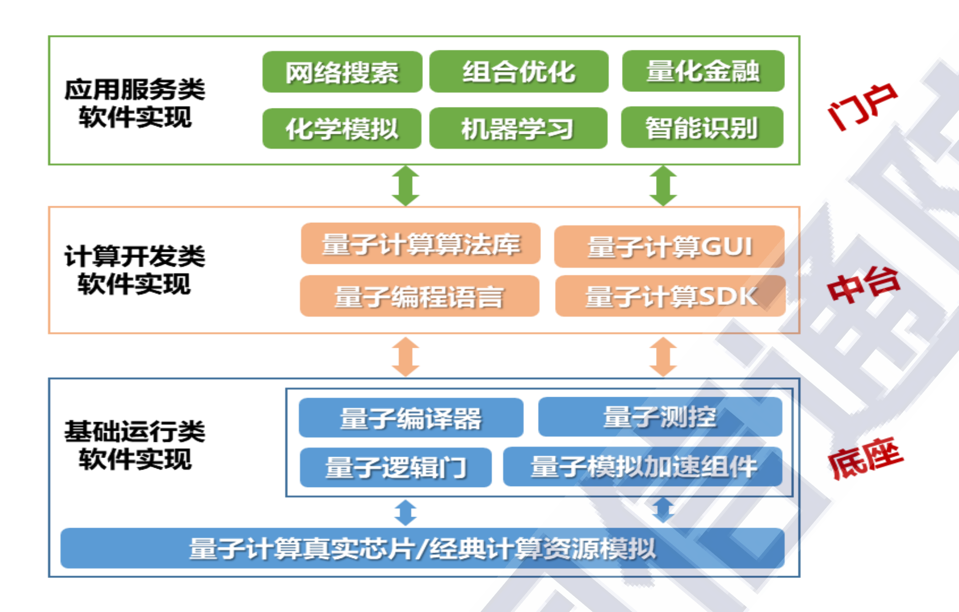
图 10 量子计算硬件物理平台的三大发展阶段

量子计算硬件物理平台研究与发展演进可大致分为三个阶段，如图 10 所示。当前正处于工程实验验证和原型样机研发的技术攻坚期，即将进入中等规模含噪量子（Noisy Intermediate Scale Quantum，简称 NISQ）专用处理器研制与应用探索阶段。在此阶段将基于百位量级物理量子物理比特，在含有噪声，即未实现量子纠错的条件下，探索开发相关应用和解决特定计算困难问题。随着量子物理比特数量和质量未来的提升，远期有望实现通用量子计算机，并进一步面向更广泛的应用场景，如 RSA 密钥破解和大规模无序数据集搜索等。

（二）量子软件全新构建，量子算法展开实用化探索

量子计算在底层运行逻辑和算法软件设计等方面，与经典计算有很大不同，需要软件编程者和应用开发者具备量子计算的思维逻辑和工程适配能力，量子计算软件的开发与应用技术栈目前处于新构阶段，量子计算的软件生态还在初步培育期。量子计算软件的分类如图 11

所示，大致可分为底座型基础运行类软件、中台型计算开发类软件和门户型应用服务类软件等三种不同类型。



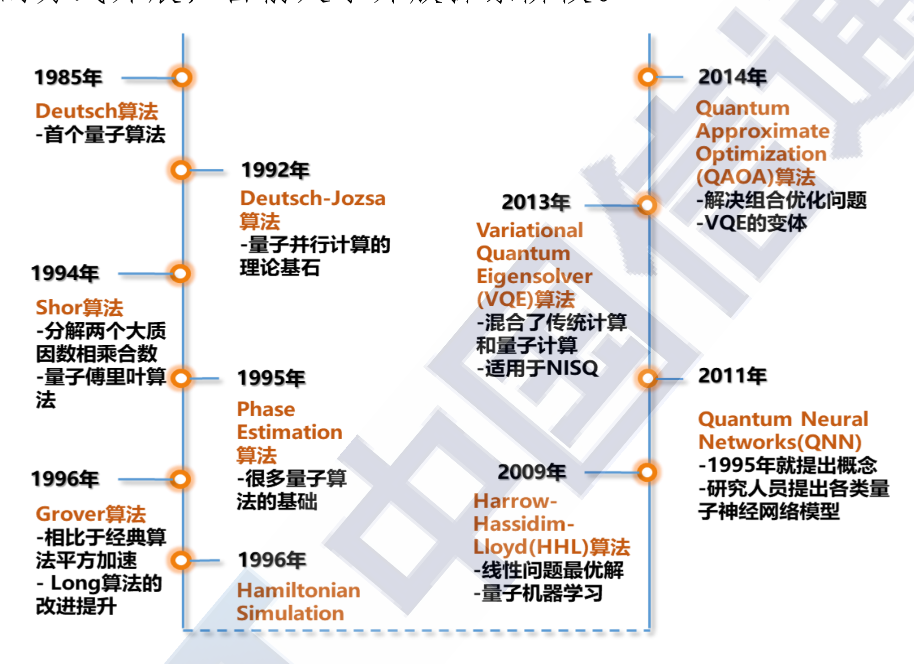
来源：中国信息通信研究院

图 11 量子计算软件三大类型及其功能应用

基础运行类软件基于硬件设计实现基础软件功能，包括量子逻辑门、量子电路、量子模拟加速组件、量子编译器和量子测控器等，是量子计算软件技术发展核心，也是上层软件开发和应用功能的实现基础。技术门槛高，专业人才匮乏，目前仅少数高端测控或精密仪器类型企业布局参与，软件类型较为稀缺，处于发展初期。

计算开发类软件通过封装基础组件实现开发功能，包括量子编程语言、量子算法库、量子计算 GUI 和量子计算 SDK 等，定位于提供量子计算软件技术应用开发平台。编程框架及开发库主要以开源项目方式呈现，软件体量大，应用生态建立逐步开展。目前，科技巨头利用产业生态位优势，联合上下游企业与用户，积极开展相关布局和开源社区建设，正在快速迭代，产业参与度高发展活跃。

应用服务类软件通过上层编程开发，探索面向不同应用领域的业务与服务软件，包括分子化学、网络搜索、智能识别、量化金融、材料设计和机器学习软件等。应用服务类软件定位于匹配行业应用需求，开展计算困难问题建模，体现量子计算的算力优势，是量子计算阶段开展实用化探索的关键。应用软件研发多以量子计算和行业应用企业合作的方式开展，目前处于开放探索阶段。



来源：中国信息通信研究院根据公开资料整理

图 12 代表性量子计算算法研究与发展历程

量子计算未来有望进入 NISQ 专用机的应用探索阶段，挖掘含噪约束下的量子计算能力，探索未来大规模通用量子计算的算力潜力是算法领域的研究热点。量子算法研究存在多种探索方向，主要代表性算法的发展历程如图 12 所示，其中 NISQ 条件下经典+混合量子算法、通用量子算法和量子启发式经典算法成为近期热点。

NISQ 条件下经典+混合量子算法是当前业界关注的焦点之一，其中以 VQE 和 QAOA 为代表的算法有望在 NISQ 计算架构下解决化学

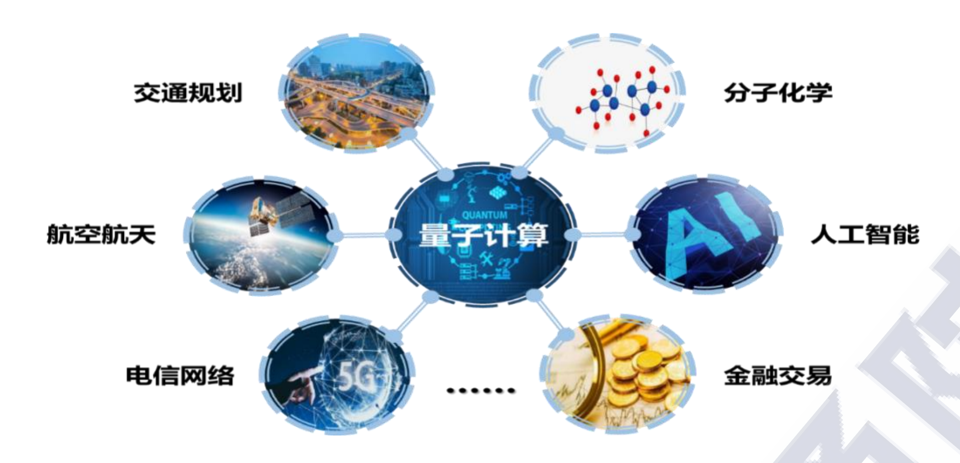
模拟和组合优化等特定计算问题。2020年8月Google报道实现两个氮原子和两个氢原子组成的二氮烯分子的异构化反应的过程模拟，华为发布HiQ Fermion量子化学模拟应用软件，利用VQE算法进行化学分子能量预测，为近期代表性成果。

通用量子算法中的量子机器学习是目前研究热点之一，但仍有诸多开放性问题处于探索阶段，如数据与特征的量子编码与制备问题，量子版本机器学习是否可以真正发挥量子计算优势，复杂灵活的机器学习任务如何与量子计算硬件进行协同等问题，仍有待进一步探索。Google发布TensorFlow Quantum和量子卷积神经网络方案，提供在线训练和模型评估功能，有望加速量子机器学习探索。

量子启发式经典算法是近期提出的新研究方向，通过在经典计算机上借鉴量子计算的设计思想、数据结构和计算逻辑，可实现对推荐系统等特定问题的处理加速，有望成为新的实用化探索方向。

（三）量子计算应用场景探索多元化开展，前景看好

近期，量子计算在不同领域和行业开展了较为广泛的应用探索，未来将进入应用探索和成果涌现的“活跃期”。未来五年左右，基于NISQ专用量子计算机，有望在量子化学模拟、量子组合优化、量子机器学习等前沿探索领域率先取得突破，出现“杀手级应用”，打开量子计算实用化之门。在量子计算应用探索中代表性的典型应用场景和领域如图 13 所示，近期主要进展集中在量子化学模拟、量子机器学习和量子组合优化等应用探索方面。



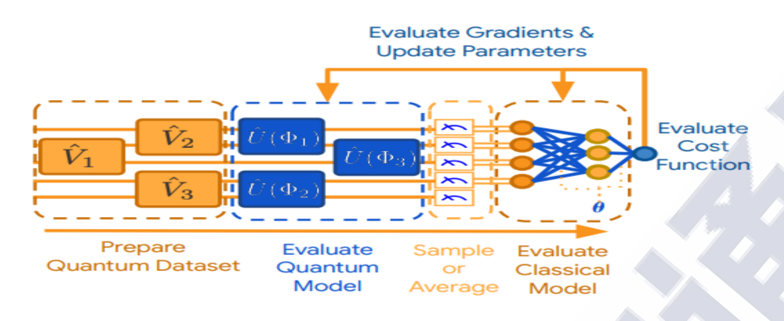
来源：中国信息通信研究院

图 13 量子计算的潜在应用场景和行业领域

化学反应过程的模拟和分析对于经典计算机来说，由于变量复杂和建模困难，计算量将呈指数级增长，非常具有挑战性。量子化学模拟在化学制剂和生物医药研发等领域具有广阔应用潜力，或将成为未来量子计算可切入的市场之一。据相关报道，量子模拟可提高药物发现率，并节约研发时间，同时更优的分子设计将提高药物审批率。国内外已有若干量子云计算企业与医药行业企业合作，开展量子化学模拟的应用探索研究工作。2020 年 8 月，Google 报道量子计算机模拟了迄今最大规模的化学反应，再次震惊量子领域。量子处理器模拟一个由两个氮原子和两个氢原子组成的二氮烯分子的异构化反应，结果与经典计算机上进行的模拟结果一致，验证了此次实验正确性。

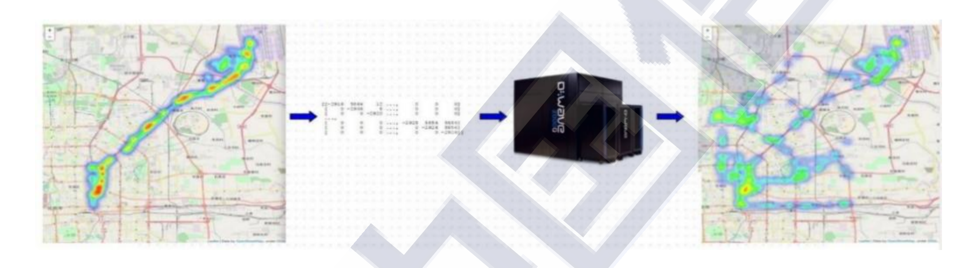
在数据规模不断增长，传统计算机处理能力接近极限的背景下，量子计算潜在的算力优势让其与机器学习的结合成为业界关注的方向。将量子计算运用于机器学习，不仅能突破传统计算机无法解决的问题，更会为机器学习领域带来全新的技术变革。例如，Google 开发并公布了 TensorFlow Quantum 计算框架，如图 14 所示。研究人员基

于量子机器学习框架，在云端计算图中组装量子电路，可以建立量子卷积神经网络（QCNN），并按照 AI 算法开放人员的操作习惯，实现在线训练和模型评估，有望加快量子机器学习的应用探索。



来源：Google Tensorflow-Quantum White Paper

图 14 Google 量子机器学习 Tensorflow-Quantum 框架



来源：D-Wave 公司官方网站

图 15 D-Wave 公司量子退火交通组合优化应用

组合优化问题是在一定约束条件下，寻找某个多变量目标函数的极小值，这个极小值被认为是全局最优解，然而组合优化问题的搜索空间往往随着搜索规模呈指数级增长，导致有效时间内难以求解，或难以获得全局性最优解。量子退火算法和量子近似优化算法等有希望为超大规模的特定组合优化问题提供解决方案。如图 15 所示，加拿大 D-Wave 公司与大众中国合作，基于 D-Wave 量子计算云平台运行量子退火算法，对北京地区一万辆出租车的 GPS 交通流向数据进行组合优化求解，计算在 32 公里路程中以最快的速度到达目的地的规划方案，探索缓解超大型城市的交通拥堵问题。

自从 2019 年 Google 在量子随机线路采样问题上展示了量子优越性，对量子计算实用化探索形成了良性激励。以应用为导向，在诸多领域开展量子计算解决实际计算困难问题的先导性探索，将成为量子计算未来发展的主要特征之一。当前阶段，诸多行业看好量子计算的商业潜力，如果某个具有应用价值的算法一旦验证其加速有效性后，可能会具有巨大的市场需求。根据波士顿咨询（BCG）公司预测，到 2030 年量子计算应用的市场规模有望达到 500 亿美元。近期，法国航天巨头空客（Air Bus）公司组织量子计算应用挑战赛，邀请全球量子计算企业参加，我国本源量子成为进入决赛五支队伍之一。

（四）量子云计算技术架构逐渐成型，竞争日益激烈

量子云计算通过经典云计算网络提供量子计算硬件接入、模拟及软件服务，将成为未来量子计算能力输出的主要途径之一。国内外云计算企业、初创公司和科研机构普遍看好量子云计算应用和产业发展潜力，加快布局推动，在技术能力和服务模式等方面各具特色。

技术栈	关键技术	显著特征
■ 应用服务	量子机器学习、组合优化、金融投资、化学材料	实现面向行业的量子计算软件应用服务，完成量子计算需求映射、体现量子计算优势
↕ 程序接口		
■ 工具框架	量子编程框架、量子算法库、量子计算GUI、量子计算SDK	提供量子计算功能、量子计算算法、量子芯片能力验证的软件开发工具
↕ 开发接口		
■ 计算底座	量子中间件、量子线路、量子加速组件、量子编译器、量子计算操作系统	量子计算底座实现量子计算的基础逻辑
↕ 硬件接口		
■ 硬件引擎	量子芯片、量子测控、量子制备存储、经典云设施	真实量子计算、模拟量子计算和经典+量子混合计算成为量子计算云平台计算后端的主要特征

来源：中国信息通信研究院

图 16 量子云计算的技术栈架构与主要特征

量子云计算技术架构逐步成型，层次化设计基本清晰，如图 16

所示。其中，硬件底座为量子计算云平台的核心部分，利用传统的计算设施与量子处理器、量子存储、量子测控技术等提供强大的算力，量子云计算的后端形态呈现多样化技术特征，主要包括真实量子计算、量子计算模拟器和经典-量子混合计算三种方式。量子计算引擎实现基础的量子计算功能，包括量子中间表示、量子逻辑门、量子电路、量子模拟加速组件、量子编译器等。工具框架层为用户提供封装后的量子计算功能，包括量子编程语言、量子算法库、量子计算 GUI 和量子计算 SDK 等。应用服务层在计算引擎与工具框架基础上，进一步实现面向用户的软件服务，如量子算法开发 API 和行业服务等。

量子云平台在量子计算研究和应用产业发展过程中的角色定位日渐清晰，主要应用与服务发展定位包含三个方面，如图 17 所示。一是，助推量子计算技术产业发展。二是，促进多领域创新融合。三是，加速量子计算科普与教育。

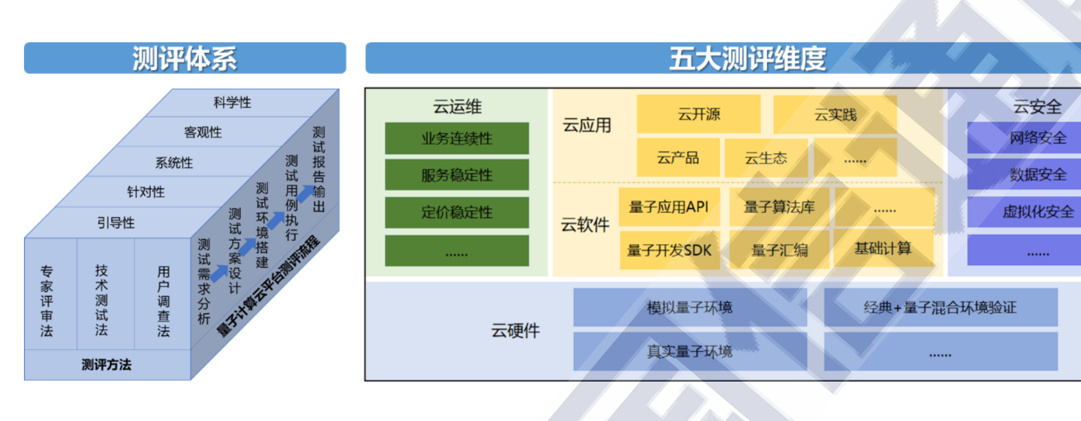


来源：中国信息通信研究院

图 17 量子云计算的应用与服务发展定位

国外科技巨头 IBM、Google、微软、Amazon 等纷纷布局量子云计算，抢占未来发展先机，初创企业百家争鸣，为培养用户习惯与生

态地位，目前竞争如火如荼，量子云计算产业发展进入快车道。国内量子云计算产业起步较晚，目前典型企业包括阿里巴巴、华为、百度等科技公司和本源、量旋等初创企业，在软硬件研发、生态建设方面与全球先进水平仍有一定距离，但发展势头和前景良好，依托国内海量的用户群体与信息化基础，量子云计算产业将逐步兴起。



来源：中国信息通信研究院

图 18 量子云计算测评体系与五大测评维度

量子云计算当前处于快速发展阶段，不但具有复杂的技术特征，同时具备多态的应用场景与服务体验。量子云计算的科学测评，在方法论和实践层面，对引导量子计算的技术、产业、服务良性发展具有重要推动作用。如图 18 所示，针对量子云计算的技术现状、服务模式和应用需求，中国信通院与业界协同探索量子云计算评测体系研究，提出量子云计算测评体系框架，包括测评原则、测评方法、测评流程、测评框架等方面。基于体系框架和测评维度对国内外量子云计算平台和相关服务开展初步评测探索，相关发展态势研究分析和量子云平台测评内容可参见中国信通院于 2020 年 10 月发布的《量子云计算发展态势研究报告（2020）》。

（五）应用产业生态逐步构建，标准化研究同步推进

在量子计算样机研发、应用探索和产业生态构建等方面，美国多年来持续大力投入，已建立领先优势，更将量子计算研发提升至阿波罗登月计划的高度，认为是必须占领的下一个技术高地。加、英、欧、日、澳等国也具备很强技术实力并紧密跟随，相关国家之间形成并不断强化联盟优势。

科技巨头间的激烈竞争，有力推动了量子计算技术的加速发展。Google、IBM、Intel、微软、Honeywell、Amazon 相继加入，产业巨头基于雄厚的资金投入、工程实现、软件控制能力和云计算服务资源，积极开发原型样机产品，构建产业联盟和产业生态，通过不同商业模式展开激烈竞争，对量子计算研究成果转化和应用加速发展助力明显，科技巨头量子计算领域布局发展情况如图 19 所示。

	IBM	Google	intel	Microsoft	Honeywell	amazon
商业模式	全栈式：硬件+软件+云服务	全栈式：硬件+软件+云服务	硬件	全栈式：硬件+软件+云服务	全栈式：硬件+软件+量子云服务	硬件+量子云服务
硬件路线	超导	超导	硅量子点、超导	拓扑、光学（投资PsiQ）	离子阱	超导，并与D-Wave(退火)、IonQ（离子阱）和Rigetti（超导）合作
量子比特数量	最高65位，53位量子体积64，计划2023年1000+	最高72位，53位证明量子优势	硅量子点2-4位；超导49位	计划2023年100拓扑量子位，最高相当于1000逻辑比特	10位全连接量子比特量子体积达到128	量子体积16，近期目标量子体积64，计划未来五年每年提高一个数量级
量子软件	开源Qiskit软件	TensorFlow-Quantum、FermiNet	—	QDK开源工具包（Q#语言、Toffoli模拟器等）	开发优化、机器学习、化工材料等领域的应用程序	—
量子云平台	自有云平台IBM Q Experience,用户可访问IBM和AQT	OpenFermion量子化学专用服务	—	自有云平台Azure Quantum，提供IonQ+QCI+Honeywell三家量子云服务接入	与微软云平台合作提供量子计算云接入服务	自有云平台AWS Braket，提供IonQ、Rigetti、D-Wave三家量子云服务接入

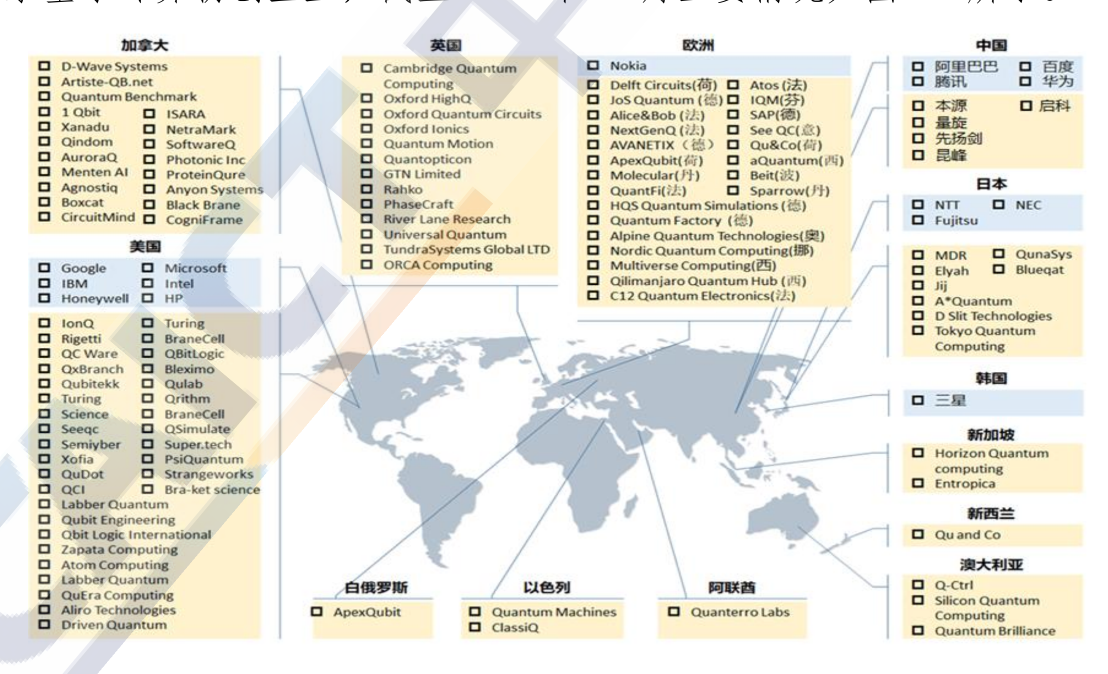
来源：中国信息通信研究院根据公开资料整理

图 19 国外科技和产业巨头量子计算领域布局和发展情况

IBM、Google、Honeywell、微软均采取硬件、软件及量子计算云服务的多方位全栈式商业模式；量子处理器硬件方面，IBM、Google主攻超导路线，Honeywell 专注离子阱路线，微软布局拓扑和投资光

量子两种路线。四家科技巨头均推出量子计算云平台，微软可提供三家合作企业和不同技术路线的量子硬件云接入服务。Intel 侧重量子处理器硬件研发及制造代工，同时布局硅量子点和超导技术路线。Amazon 专注量子云服务，硬件方面与初创企业及高校合作，可提供退火、离子阱和超导不同量子处理器接入方案。我国阿里巴巴、腾讯、百度和华为近年来通过与科研机构合作或聘请国际知名科学家成立量子实验室，在量子处理器硬件、量子计算云平台、量子软件及应用开发等领域进行布局。总体而言，我国科技企业进入量子计算领域相对较晚，在样机研制及应用推动等方面存在一定差距。

初创企业是推动量子计算技术和产业发展的另一重要力量。近年来，各国政府、产业巨头和投资机构的投入持续增加，全球已有百余家量子计算初创企业，截至 2020 年 10 月主要情况如图 20 所示。



来源：中国信息通信研究院根据公开资料整理（截至 2020 年 10 月）

图 20 量子计算领域科技公司和初创企业分布情况

欧美初创企业涵盖软硬件、算法及应用各环节，企业集聚度仍以

北美和欧洲最高。量子计算门槛高难度大，D-Wave、Qilimanjaro Quantum Tec（QQT）、Rigetti、Alpine Quantum Technologies（AQT）、Xanadu 和本源量子等部分公司采用全栈式商业模式，开展基于退火、超导、离子阱、光学或硅半导体等技术路线的量子处理器硬件、开源软件平台和量子计算云服务等方位探索。QCI、IonQ、Silicon Quantum Computing（SQC）和 PsiQuantum 等则专注硬件研发或量子计算云平台局部发力，探索提供更好的系统控制和逻辑门操作解决方案等。Zapata Computing、QC Ware、1Qbit 和 Quantum Benchmark 等致力于量子计算软件算法及应用研究，包括错误评估及性能验证等。

量子计算目前仍处于应用和产业探索的初期，但气象、金融、石油化工、材料科学、生物医学、航空航天、汽车交通、图像识别等众多行业已开始关注和重视到其中的巨大发展潜力，开始与科技企业和初创企业合作探索，生态链不断壮大。其中，不同类型的产业联盟在量子计算生态建设中起到了巨大的推动作用。IBM 发起 Q Network 联盟，全球超过 100 家组织、160 个国家、20 万名用户使用其量子计算云服务，探索在人工智能、金融、智慧交通、生物医药、航天航空等领域的应用。微软成立“微软量子网络”和“西北量子联盟”，成员包括数十家企业及研究机构。加拿大成立了量子产业部（Quantum Industry Canada，QIC），聚集了量子领域的 24 家公司，向全球的量子技术生态系统、人才和投资者宣传加拿大的量子准备，同时与省政府和联邦政府合作，从战略上支持量子技术这一新兴产业的发展。在产业配套设施设备供应链方面，精密机械、低温平台、真空室、微波器件、光

学组件及系统等产业基础配套不断完善，既有 Janis Research 等老牌企业提供已有工业基础平台的共享，也有 ColdQuanta、Qblox 和 Quantum Microwave 等新兴企业推动助力发展。

ITU-T、IEEE、ISO/IEC 等国际标准化组织纷纷开展量子计算标准化布局以及标准化研究的前期工作。IEEE P7130 正在开展量子计算术语定义相关标准化研究，P7131 开展量子计算性能度量指标和基准测试相关标准化研究。ITU-T QIT4N 焦点组在 WG1 中开展量子计算应用场景和网络影响等方面的标准化预研工作。ISO/IEC 开展对量子计算的标准化需求、应用场景和术语定义研究。全国量子计算与测量标准化技术委员会（TC578）目前正开展量子计算术语定义标准项目 1 项，研究课题 4 项。

三、量子通信领域研究与应用进展

外界对量子通信或存在一些误解和过度解读，容易引发不必要的争议，不利于凝聚共识形成合力，此处择要做几点解释说明。**第一**，QKD 只是量子通信的应用之一，直接将二者划等号以偏概全，并非恰当表述；**第二**，量子通信的本质是实现未知量子态（Qubit）的传输，与传输确定信息（Bit）的经典通信面向不同应用场景，更不存在替代关系；**第三**，量子通信必须借助经典通信的辅助才能完成，例如 QKD 中的协议后处理信息交互，QT 中的贝尔态联合测量结果传输等，不存在信息超光速传输的情况；**第四**，量子通信中的 QKD 和 QT 等应用，有望为提升经典通信的安全性或组网协议功能等方面提供新型解决方案，但实用化和工程化等方面仍有问题瓶颈需探索突破。

（一）构建量子信息网络是量子通信发展远期目标

量子信息网络基于 QT 实现未知量子态信息的传输和组网。收发双方首先通过纠缠光子对 A、B 的制备与分发，即量子纠缠分发，构建量子通信信道。之后发送方将包含未知量子态信息的光子 X 与纠缠光子 A 进行贝尔态联合测量，并通过经典通信信道告知接收方测量结果。最后接收方据此对纠缠光子 B 进行相应的酉变换操作，得到发送方光子 X 的量子态信息，完成量子通信过程。其中，量子态信息的物理载体是单光子或光子纠缠对，也称“飞行量子比特”；传输介质可采用光纤或自由空间信道；为克服环境噪声、传输退相干和信道损耗等影响，需要进行量子态信息存储，以及基于量子纠错、纠缠纯化和纠缠交换实现的量子中继；各种量子态信息处理器节点，如量子计算机和量子传感器等，其中的物质量子比特，如电子自旋和冷原子等，也需要与光子进行量子态的转换以实现传输。

量子信息网络通过量子隐形传态实现量子态信息在处理系统和节点之间的传输，可以形成多个量子信息处理模块的互联互通。对于量子计算模块而言，由于量子态的叠加特性，实现 n 位量子态信息的互联，将可以使其表征的状态空间，以及相应的状态演化处理能力得到 2^n 倍指数量级提升，扩展量子计算处理能力。对于量子测量模块而言，在多参数的全局变量测量条件下，基于纠缠互联形成量子传感器网络，将可以进行提升测量精度，突破标准量子极限，在量子时钟同步网络和量子限精密成像设备组网等方面获得应用。此外，实现广域端到端量子态确定性传输，也将为提升安全通信能力，发掘新型复杂

网络组网协议方案等方面提供目前无法企及的解决方案。

在量子信息网络的潜在应用探索方面，国内外相关研究和实验已经取得一些初步进展，但多为原理性探索和概念性实验验证，距离实用化仍有较大差距。2012 年，奥地利维也纳大学报道首个基于测量的盲量子计算实验，通过远端量子计算处理器将量子位置于纠缠态，由计算用户发送未知量子态控制运算演化，并获取计算结果，从而实现远程量子计算任务的安全加密委托。2014 年，英国帝国理工报道采用基于噪声阈值 13.3%表面编码纠错算法和纠缠纯化技术建立量子计算单元之间的互联信道，实现 2MHz 频率的计算处理互联，但存在 98%的光子纠缠损失，仅可达到 kHz 量级的 Qubit 交互速率。2017 年，以色列希伯来大学报道了基于多维纠缠簇态的多方领导者选举量子纠缠协议算法，基于预先共享多维纠缠簇态实现无需多方协商的云计算网络领导者选举，通过对各方共享量子纠缠态进行异步测量，以测量结果标注领导者，可以保证选举过程的随机性和公平性。2020 年，中科大报道基于“墨子号”卫星和双向自由空间量子密钥分发技术的量子安全时间同步实验。卫星和地面站实现单光子级时间同步信号传输，时间脉冲频率为 9kHz，量子信道误码率为 1%，时间传递精度达到 30ps，推动了基于卫星实现量子时间同步组网的实验探索。

量子信息网络是集量子态信息传输、转换、中继和处理等功能为一体的综合形态，被认为是量子通信技术发展的远期目标。根据关键使能技术需求和预期应用场景，量子信息网络技术发展和组网应用大致可分为量子加密网络、量子存储网络和量子计算网络三个阶段。

量子加密网络可被认为是量子信息网络的初级阶段，基于量子叠加态或纠缠态的概率性制备与测量，可以实现密钥分发、安全识别和位置验证等加密功能，典型应用是已进入实用化的 QKD 网络。我国量子通信领域研究和应用探索目前侧重于量子加密网络层面。目前，由于量子存储中继技术无法实用，QKD 远距离传输和组网依靠密钥落地逐段中继的“可信中继”方案。

量子存储网络是量子信息网络下一阶段研究和应用探索关注的重点，将具备确定性纠缠分发、量子态存储和纠缠中继等功能和能力，可支持盲量子计算、量子时频同步组网和量子计量基线扩展等新型应用。量子存储网络是未来量子通信研究和应用探索关注的重要方向，国外开始在基础组件、系统集成、组网实验和协议开发等方面进行布局研讨与推动，发展趋势应引起关注和重视。

量子计算网络是量子信息网络各项关键技术成熟融合之后的高级阶段，将进一步包含可容错和纠错的通用量子计算处理和大规模量子纠缠组网等功能和能力，可用于分布式量子计算提升量子态信息处理能力，以及实现量子纠缠协议组网等应用场景。需要说明的是，对于量子计算网络终极形态中可能诞生的潜在应用和引发的技术变革，当前阶段仅为管中窥豹，无法全面预测分析，但其中所蕴含的可能性和想象空间，或不亚于今日之互联网。

（二）实现量子信息组网仍有待核心关键技术突破

量子信息网络将是通过量子纠缠信道进行量子态传输的新型网络，与经典信息网络在基础物理资源，信息传输和承载物理信道，信

号状态的调控、转换、存储与中继方案，组网设备和连接对象，网络协议架构，组网的发展目标及应用演进发展趋势等各方面都存在较大差异，本节尝试从上述各方面对量子信息网络和经典信息网络的相关特性进行初步的梳理与对比，如图 21 所示。从中可以看出，构成量子信息网络的关键使能技术，核心组网控制机理，基础使能组件和架构接口协议等问题尚处于研究和讨论的初步阶段，其研究和应用探索刚刚起步，短期内并不存在大规模部署和落地应用前景。

	特性	量子信息网络	经典信息网络
1	物理资源	以光子、电子、冷原子等微观粒子系统承载的未知量子态（Qubit）	以电流、电压、电磁场、光波等宏观物理量表征的确定性信号
2	传输方式	基于纠缠分发和测量等实现量子态传输（目前为后验概率性实验验证）	电信号、光信号、微波信号等的调制发射、信道传输和解调接收
3	传输介质	光纤、自由空间等（损耗和退相干等待研究）	光纤、电缆、自由空间等
4	调控转换	基于激光、微波等实现量子态操控测量，不同量子体系间的量子态转换（转换待研究）	基于受激辐射、频率变换、光电效应等机理实现电、微波与光信号之间的调控与转换
5	中继方案	基于量子态存储和纠缠交换的量子中继（实用化量子存储技术尚未突破）	电信号再生、微波信号中继、光信号放大等
6	连接对象	量子计算机、量子传感器等量子态信息处理终端（量子计算机物理平台技术路线未收敛，不同领域量子传感器存在多种量子体系）	计算机、智能终端、传感器、服务器等经典信息处理网元或终端
7	组网设备	量子纠缠源、量子态转换器、量子中继器等（理论研究与实验探索，实用化尚远）	路由器、中继器、交换机、光交叉设备等
8	协议架构	物理链路层实现纠缠分发，网络层实现纠缠组网等（架构、接口、协议等待研究）	HTTP、SNMP、TCP/IP、UDP、Ethernet等
9	目标愿景	实现量子态互联和处理能力的指数级提升	实现网络价值与连接用户数的平方率提升
10	应用演进	提升通信安全性，实现分布式量子计算，网络化量子测量等（远期应用尚难预测）	多用户、高速率、广覆盖、低时延、灵活组网、确定性传输等

来源：中国信息通信研究院

图 21 量子信息网络与经典信息网络特性对比

量子信息网络物理层的核心基础组件从功能模型角度，可以大致分为量子纠缠源、量子态探测器、量子态转换器、量子态存储器和量子态信息处理器。其中，量子纠缠源是提供基础物理信道资源的关键使能器件，实现高品质确定性量子纠缠制备分发以及高维量子纠缠态操控，将是实现量子信息网络的第一项控制性因素。量子态探测器具备单光子量级的信号探测能力，并支持贝尔态联合测量等量子叠加态

和纠缠态检测功能。量子态转换器实现信道中的“飞行量子比特”与存储器和处理器中的物质量子比特之间的量子态读写转换，可能涉及多种不同类型（如光子、电子和原子等），不同能级（如微波、可见光和电信波段等）和不同编码自由度（如偏振、相位和时间等）量子比特之间的相互转换，将是量子态信息实现跨体系互联和组网的第二项控制性因素。量子态存储器包含多种可能的物理实现方案（如气态冷原子系综，固态囚禁离子和金刚石色心，以及全光子簇态等），可实现网络中继节点或处理节点中的量子态接收和存储。各种方案的量子存储技术目前均处于实验研究阶段，在存储深度、带宽、时间和读取效率等方面指标难以满足实用化要求。突破实用化量子存储中继技术，将是实现量子信息网络的第三项控制性因素。量子态信息处理器广义上可包含量子计算机和量子传感器等终端处理节点，网络层面主要指具备纠缠纯化和纠缠交换功能的量子中继器。量子态信息处理器的突破和实用化，将是实现最高级形态的量子计算网络的第四项控制性因素，而这与量子计算和量子测量领域的发展与演进关系紧密。

量子信息网络的核心基础组件处于研究探索阶段，近年来国内外相关研究和实验取得一些初步进展。2019 年，中科大报道基于多维纠缠簇态制备和后选择贝尔态测量实现多信道间光子对任意连接，提升纠缠态分发效率，基于六个独立参量下转换双光子纠缠源实现 12 光子无存储量子中继器。荷兰德尔福特理工报道基于固态电子自旋量子位，实现存储时间可达一分钟的 10 位量子存储器，通过 NV 色心控制电子自旋，以微波脉冲进行控制和光脉冲读出，未来可扩展进行纠

错编码。美国国家技术标准局报道基于离子阱体系实现 340um 间隔量子比特位之间受控非门（CNOT）逻辑运算操作隐形传态，其中以镁离子纠缠对分发和铍-镁离子 BSM 实现联合逻辑门操作，成功率达 87%。2020 年，中科大报道冷原子系综存储器之间纠缠操作实验，在实验室 50 公里距离和现网 22 公里距离实现量子纠缠操作实验，其中采用环形腔增强光子与原子系综耦合，非线性频率转换优化光纤传输效率，双重相位锁定控制光程差。中科大和美国国家技术标准局联合报道在离子阱体系中对带电的钙原子和氢化钙分子进行基于激光调控的联合调控，观测二者之间能量状态变化的关联系，首次制备和观测到单原子和单分子之间的量子纠缠态。中科大报道采用飞秒激光加工实现稀土离子晶体光波导固态量子存储器，保真度达到 99%并具有可集成和扩展性，使用 0.5K 深低温共振谱仪，提高自旋回波信噪比，提升量子存储时间至 40ms 量级。量子信息网络的核心基础组件研究目前仍处于开放式探索阶段，解决方案和技术路线尚未收敛，控制性因素在短期内获得重大突破并达到实用化水平可能性较小。

在量子信息网络核心基础组件研究的基础上，网元设备系统化集成和组网传输技术验证也开始初步布局和探索。在系统化集成方面，主要是借鉴经典信息网络的解决方案和成熟经验，将网络基础设施中的超低损耗光纤、光路交换开关和复用解复用器等辅助性组件，与前述的核心组件进行波长带宽规划和光学接口规范等方面的系统化集成和软件定义化管控。由于目前核心基础组件尚未实现技术方案定型和实用化突破，目前所提出的系统化集成仍是初级阶段的框架性和总

体性概念，具体实现方式仍需要长期发展演进。预计在基础组件获得突破之后，系统集成和管控等方面的成熟方案和经验将可以较为快速的重用和移植，预计将不会是量子信息组网的主要技术障碍。

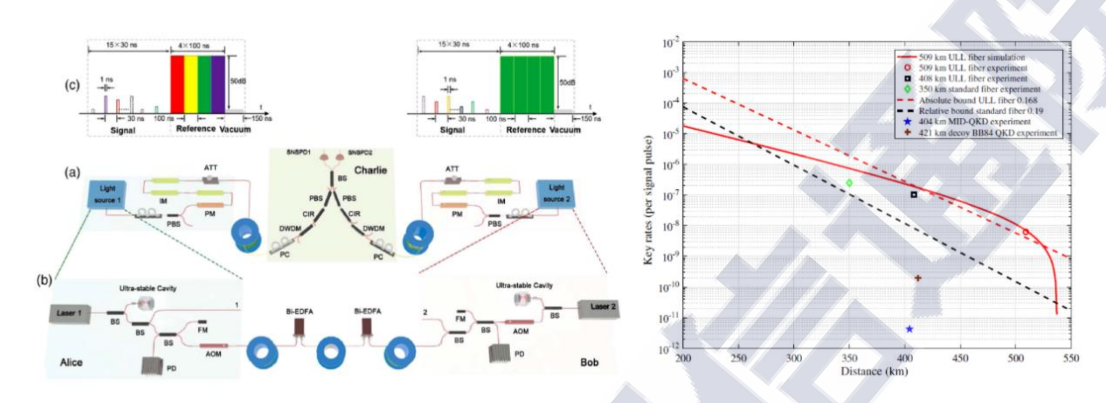
在组网传输技术验证方面，国外计划和部署开展包含初步量子存储中继功能的多节点和中长距离组网传输试验网的技术验证和应用场景探索，同时推动网络架构、堆栈和协议等方面的探讨和标准化。目前组网传输技术验证仍处于布局起步阶段，主要是针对现阶段可用的初级基础组件原理样机开展验证，并为基础组件研究提供引导、助力和检验。未来将在系统架构、协议接口、配置方案和互联互通等方面开展研究、验证和相关标准化工作。

（三）QKD 科研取得新成果，应用与产业化持续探索

作为量子通信领域目前进入初步实用化的应用方向，QKD 技术在国内外相关科研团队的持续推动下，科学研究方向逐步聚焦，实验探索进一步深入，在新型协议系统，最远传输距离，芯片化集成和组网场景开发等方面取得一系列新成果。本节对 QKD 领域最新代表性科研进展进行简要综述，供业界参考。

在离散变量量子密钥分发（DV-QKD）技术路线方面，基于中间节点进行单光子干涉测量的新型双场量子密钥分发协议（TF-QKD）能够消除测量节点的安全漏洞并进一步提升 QKD 系统的传输能力，成为未来 QKD 技术升级演进和设备研发关注的重要方向。2020 年，中科大和清华联合报道了基于改进型 TF-QKD 协议和超导纳米线单光子探测器（SNSPD）实现 509 公里距离超低损光纤传输，成码率约

为 0.1bit/s，成为 DV-QKD 系统传输距离的新纪录，系统如图 22 所示。其中所提出的“发送-不发送”改进型协议能够有效提升系统相位噪声容忍度，同时通过采用时频传输技术结合附加相位参考光传输，可以实现远距离传输条件下的单光子级精准干涉控制。

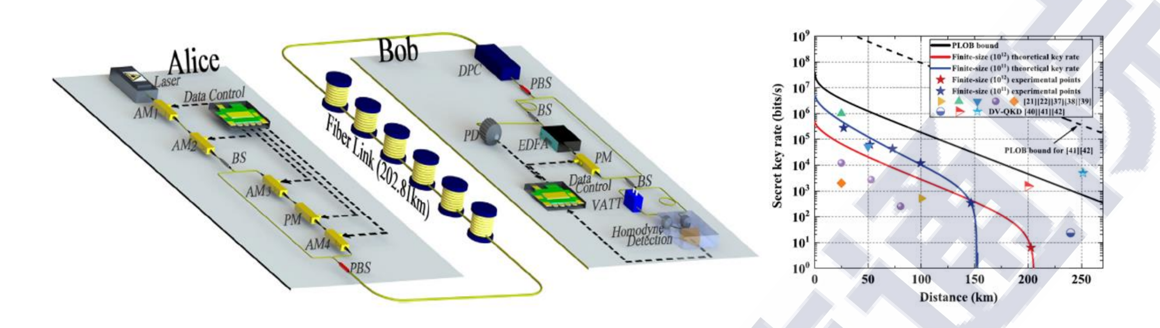


来源：中国信息通信研究院根据论文整理 DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.070501

图 22 中科大报道改进型 TF-QKD 系统 509 公里超低损光纤传输实验

将 QKD 系统收发机的调制解调器件进行片上光学集成，可以提升系统集成度、可靠性和性价比，是未来 QKD 设备升级研发的重要方向。2020 年，中科大报道基 1.25GHz 工作频率，偏振编码硅光集成调制器的测量设备无关量子密钥分发（MDI-QKD）系统，通过使用 SNSPD 作为中间测量节点，实现 36dB 传输信道损耗条件下的 31bit/s 密钥成码率。以卫星平台作为密钥中继、中间测量点或纠缠分发源，可以实现远距离的 QKD 直接传输或中继组网，是未来 QKD 前沿研究和应用探索的重要方向。2020 年，中科大报道基于墨子号卫星进行纠缠分发，首次实现在相隔 1120 公里的无中继地面站之间的 BBM92 协议纠缠态 QKD 传输，密钥成码率可达到 0.12bit/s。如何实现 QKD 系统与光通信系统和网络的共纤传输和融合组网，是推动实际网络部署和规模化应用的重要研究方向。2020 年，英国布里斯托大学报道基

于波长选择开关和光开关矩阵实现波长级和端口级联合调度的 QKD 系统与光网络多维度组网调度的实验方案，为 QKD 的网络级集成部署提供了新思路。



来源：中国信息通信研究院根据论文整理 DOI: 10.1103/PhysRevLett.125.010502

图 23 北邮和北大联合报道 CV-QKD 系统 202.81 公里传输实验

在连续变量量子密钥分发（CV-QKD）技术路线方面，CV-QKD 系统在成本和集成度方面具有潜在优势，但远距离传输能力方面与 DV-QKD 相比有一定差距。2020 年，北邮和北大联合报道在如图 23 所示的实验室系统环境，实现 202.81 公里距离超低损光纤传输和 6.214bit/s 成码率，成为 CV-QKD 系统远距离传输的新纪录。CV-QKD 本地本振方案成为实用化研究的发展趋势，但对激光器线宽和锁频稳定度提出更高要求。2020 年，西班牙 ICFO 报道基于单激光器的即插即用式 CV-QKD 系统方案，在 13 公里传输距离实现 0.88Mbit/s 成码率。日本 NICT 报道通过采用发送端高斯调制信号与导频信号的偏分复用，对接收端本地进行数字域 DSP 相位偏振补偿，实现 194 波信道波分复用的 CV-QKD 系统实验，25 公里距离的系统整体成码率可达到 172.6Mbit/s。CV-QKD 系统硬件采用传统相干光通信器件，易于实现光学集成，能够有效提升系统集成度与性价比。新加坡南洋理工

报道了基于硅光集成的芯片化 CV-QKD 系统实验，在 100 公里传输距离实现成码率为 0.14kbit/s。



来源：中国信通院根据公开信息整理

图 24“墨子号”量子科学实验卫星相关科研成果

2016 年 8 月，我国发射全球首颗量子科学实验卫星“墨子号”，至今已在轨稳定运行超过四年，在此期间持续开展星地量子通信科学实验，取得一系列具有国际影响力的重大创新成果，如图 24 所示。2017 年报道首次实现基于卫星纠缠光子分发的 1200 公里距离地面站间纠缠态测量；首次在卫星和地面站间完成 1200 公里距离 1.1kbit/s 码率的 BB84 协议 QKD 传输；首次在星地之间 1400 公里上行链路完成单光子比特量子隐形传态。2018 年报道基于卫星中继的中国-奥地利 7600 公里洲际 QKD 和量子保密通信视频和图像传输实验。2019 年报道基于卫星的大尺度引力诱发量子退相干模型实验验证。2020 年报道基于卫星纠缠分发的 1120 公里距离地面站之间 BBM92 协议 QKD 传输实验；基于卫星和地面站单光子探测的量子安全时频传输实验；研制成功可机动运输和快速部署的小型化量子卫星地面接收站，并在电网等应用场景完成星地 QKD 实用化技术验证，集成化水平和

系统性能得到进一步提升。我国在星地量子通信领域的科学研究处于全球领先，既体现了集中力量办大事的体制优势，也得益于相关科研团队和科技工作者的前瞻性规划布局和长期艰苦努力。

在 QKD 应用和产业化方面，国外开展了网络实验验证和商用化方案探索等工作。2019 年欧盟推出 OPENQKD 项目，联合研究机构、QKD 设备商和网络运营商，建立开放测试实验床，开展多项技术验证和现网实验。美国 Quantum XChange 公司发布 Phio TX 2.0 量子保密通信解决方案，集成 QKD、量子随机数发生器（QRNG）和抗量子计算破解加密算法（PQC）应用。韩国 SKT 联合瑞士 IDQ 公司，推出基于 QRNG 芯片的三星 5G 加密手机。

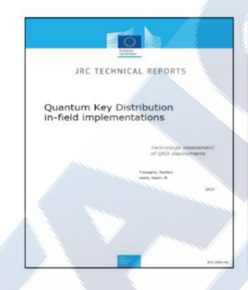
近年来，我国相关管理部门组织开展 QKD 系统设备现实安全性测评。国家电网组织开展多项量子保密通信技术实用化应用研究项目。国科量子网络承建国家广域量子保密通信骨干网络建设一期工程，陆续开展实验室系统联调和外场部署等工作。成都、南京、武汉和海口等地进一步开展或规划量子保密通信在政务信息网络的试点应用。公司层面，科大国盾量子于 2020 年 7 月登陆科创板，受到资本市场和社会舆论的关注；上海循态、北京启科和广东国腾等 QKD 市场新玩家陆续推出各具特色的商用化系统和应用解决方案；易科腾等加密应用方案提供商，在政企专网等高安全性需求领域持续开展探索。

在 QKD 标准化方面，ITU-T 在 SG13 和 SG17 开展 18 项相关标准研究，至 2020 年 10 月已有三项获批，研究工作以中日韩为主要推动力量，欧洲成员参与度有所提高，同时在 FG-QIT4N 焦点组开展

QKD 网络的术语、应用场景、协议和传输技术等方面标准化预研。ETSI 的 ISG-QKD 正持续开展六项 QKD 系统新规范或修订规范项目研究。ISO/IEC 的 QKD 系统安全性要求和测评方法标准研制进一步推进。CCSA ST7 发布我国首个量子保密通信领域的行业标准，YD/T 3834.1-2020《量子密钥分发(QKD)系统技术要求 第 1 部分：基于诱骗态 BB84 协议的 QKD 系统》和 YD/T 3835.1-2020《量子密钥分发(QKD)系统测试方法 第 1 部分：基于诱骗态 BB84 协议的 QKD 系统》，后续可为业界和用户在 QKD 设备选型、应用部署和网络运维等过程中提供必要的功能性能验证和标准参考。

（四）QKD 应用观点尚未统一，PQC 将成为竞争者

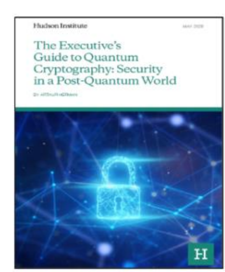
近期，欧美多家研究机构和政府部门公开发布了关于 QKD 技术特性、问题瓶颈、应用场景和发展前景的研究分析和观点立场，其中的认识理解观点各异，应用建议也是见仁见智。本节将相关研究报告，如图 25 所示，以及其中主要观点进行集中呈现，供业界参考。











来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理

图 25 近期欧美研究机构和政府部门关于 QKD 应用的研究报告

2019 年 10 月，欧盟委员会联合研究中心（JRC）发布《QKD 现网部署》研究报告[14]，梳理总结了全球各国的 QKD 现网部署情况，并

[14]https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC118150/quantum_communication_state-of-the-

对相关研究应用进展和技术指标情况进行分析。其中指出，QKD 技术是否能够提供具有无可争议优势的应用场景尚有待明确，当前应用的主要局限是密钥生成速率和传输距离有限，需要专用基础设施，以及难以实现端到端的安全性。绝大多数已知的 QKD 现网部署为公共研究资金支持，少有私营部门的应用部署。尽管 QKD 现网部署取得明显进展，但缺乏具有明显优势和定义清晰的应用场景，技术差距仍然存在，限制了其实际应用。

2019 年 12 月，美国国防部（DoD）国防科学委员会公开了《量子技术应用》研究报告的内容摘要版[15]，其中列举了对量子传感、量子计算、量子通信和纠缠分发三大领域共 24 条核心观点发现，其中三条涉及 QKD 技术。发现六：原则上，量子密钥分发（QKD）提供自然信息理论（Shannon）密码安全性。QKD 系统不支持经过身份验证的密钥交换。发现七：QKD 的实施能力或安全性不足，无法部署用于 DoD 任务。委员会任务组同意国家安全局（NSA）对 QKD 认证的评估。发现八：应了解和跟踪 QKD 在国外的开发和使用。

美国国家安全局（NSA）在其官方网站列出了关于 QKD 和量子加密应用的观点[16]。文中指出五条技术局限，一是 QKD 只是部分解决方案；二是需要专用设备；三是增加了基础架构成本和内部威胁风险；四是安全性和验证是重大挑战；五是增加了服务失效的风险。文中结论是 NSA 将抗量子计算破解加密算法（Post Quantum

art__review_4.0_final.pdf
[15]https://www.globalsecurity.org/military/library/report/2019/quantum-technologies_execsum_dsb_20191023.pdf
[16]https://www.nsa.gov/what-we-do/cybersecurity/quantum-key-distribution-qkd-and-quantum-cryptography-qc/

Cryptography，PQC，也称量子安全密码或后量子密码）视为比 QKD 更具成本效益且易于维护的解决方案。NSA 不支持使用 QKD 来保护国家安全系统中的通信，除非克服了上述限制，否则不会认证或批准 QKD 安全产品。

2020 年 3 月，英国国家数字安全中心（NCSC）发布《量子安全技术》立场白皮书[17]。其中指出，QKD 协议需要与确保身份验证的加密机制一起部署，这些加密机制也必须防范量子威胁。QKD 并不是应对量子计算威胁的唯一方法，NIST 等国际标准组织正在进行的 PQC 标准化工作，这些算法不需要专用硬件，可通过身份验证共享密钥，避免中间人攻击风险。NCSC 同意加密密钥只是保护复杂系统所必须采用的许多机制之一，需要更多研究以了解如何实现 QKD 协议并将其集成到复杂系统中。NCSC 欢迎 QKD 领域目前正在进行的研究和认证工作。NCSC 不支持在任何政府或军事应用中使用 QKD，并告诫不要在关键业务网络（尤其是关键国家基础设施领域）完全依赖 QKD。NCSC 的建议是，对量子计算威胁最好应对方法是 PQC。

2020 年 5 月，法国国家网络安全局（ANSSI）发布《是否应将 QKD 用于安全通信》技术立场报告[18]。其中指出，QKD 最合理的用途是与对称加密一起，在彼此足够靠近并由光纤连接的固定位置之间提供通信安全性。QKD 传输距离限制（或需要使用卫星来克服它们），其点对点性质以及对通道物理的依赖性，使得其大规模部署极为复杂且成本很高。QKD 对于无直连链路的两点间生成公共密钥需要依靠

[17]https://www.ncsc.gov.uk/pdfs/whitepaper/quantum-security-technologies.pdf
[18]https://www.ssi.gouv.fr/uploads/2020/05/anssi-technical_position_papers-qkd.pdf

可信中继，与目前端到端密钥协商方案相比，是一种倒退。多年来，密码界一直在考虑量子计算机威胁,新的量子安全非对称算法通过 NIST 组织的评选正在标准化,来替代易受量子计算影响的算法。ANSSI 建议在需要长期安全性（十年或更长）时尽快使用量子安全密码学（PQC）。QKD 原则上提供的安全保证带有重大部署约束，这些约束会减小所提供服务的范围，并在实践中损害 QKD 的安全保证。在点对点链接上使用 QKD 可以被认为是对传统密码技术的补充。

2020 年 5 月，美国智库哈德森（Hudson）研究所发布《高管量子密码学指南：后量子世界中的安全性》报告[19]，对 QKD 技术原理、应用场景和发展情况进行了简述。其中指出，面对量子计算的威胁，一种解决方案是抗量子计算破解密码学，但其基于加密算法无法被量子计算破解的假设，这一假设无法被证明且存在风险。另一种方案是使用量子技术提供的工具，包括 QKD 和 QRNG。QKD 是唯一的一种基于量子物理特性证明安全性的远距离密钥传输方法，将成为所有高价值数据网络的安全基石。今天，美国在这一领域并不是唯一玩家，甚至不是领导者。未来，随着 QKD 技术的发展和成熟，将形成包括空间网络在内的全球量子通信网络的基础。

公钥加密体系是当今网络信息安全的基石之一。面临量子计算可能带来的公钥数学问题计算破解风险，欧美研究机构提出研究旨在面对量子计算和经典计算均能保证其加密安全性新一代公钥加密体系，即 PQC。美国 NIST 牵头于 2016 年启动全球 PQC 算法征集和评比，

[19]https://www.hudson.org/research/15992-the-executive-s-guide-to-quantum-cryptography-security-in-a-post-quantum-world

至 2020 年 7 月已完成三轮评选，从最初的 69 项算法提案中评选出 7 项公钥加密和数字签名算法入围，预计在 2023 年左右推出 PQC 算法国际标准。我国中科院信工所团队提出的格密码提案未能入围第三轮。PQC 算法是对于已知量子计算风险威胁的一种算法层面的升级响应，但其他未知的风险与威胁仍留待未来去解决，目前评选多种算法的做法也有不把所有鸡蛋放在同一个篮子里的考虑。PQC 基于现有公钥加密体系进行算法升级，对于系统架构和硬件改动较少，利于规模化推广应用，将与 QKD 形成技术解决方案的路线竞争。二者未来也可能相互融合，但发展趋势尚有待观察。

2020 年 4 月，美国智库兰德（RAND）公司公布《量子计算时代的安全通信》报告[20]，其中预测能够破解公钥密码体系的量子计算机可能在 2033 年左右年出现，将给信息安全带来攻击性和追溯性风险，需尽快推动敏感信息业务的 PQC 升级迁移。报告同时呼吁美国政府重视量子计算带来的信息安全威胁，加快推进 PQC 标准化，在政府信息系统层面强制推行 PQC 升级，并加快其商用化应用推广。

（五）QKD 问题探讨应区分科研、工程和应用三层面

近年来，业界对于 QKD 和量子保密通信在科研、工程和应用等层面问题的认识和讨论进一步深入，未来各方聚焦 QKD 技术、应用和产业发展的核心问题，明确定位、凝聚共识、协同推动将有望成为趋势。对于 QKD 问题的分析，应当区分科学研究、工程研发和应用探索三个不同层面，以利于业界各方厘清技术和应用现状，定位存在

[20] https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR3102.html

问题和瓶颈，以及探讨未来发展趋势。

1. 科研层面

2020 年 5 月，中科大在全球物理学领域的顶级刊物《现代物理评论》发表 QKD 长篇综述论文，全面回顾了 QKD 科研历程，关键技术和重要成果，并从学术界视角回应了关于 QKD 技术的十个疑问，如图 26 所示，文中观点也代表了 QKD 学术界的主流看法，认为当前 QKD 技术面临的质疑与问题，在科研层面都可以有解决方案，并且相关研究都在推进，未来可进一步完善和提升。

编号	文中总结的疑问	文中给出的回应
1	RSA目前安全，不需要QKD	重要数据需要长期安全性，QKD适用
2	QKD vs PQC	二者并行研究，各有优缺点，可结合
3	QKD不解决大部分安全问题	QKD密钥应用广泛，性能还能提升
4	QKD传输距离限制	光纤500km，卫星更远，量子中继可期
5	QKD成本太高	集成化和芯片化QKD有望降低成本
6	QKD只能点到点传输	可信中继可组网，TF等协议可星型组网
7	可信中继限制	TF等协议无需，卫星纠缠，量子存储可期
8	设备硬件漏洞升级昂贵	MDI接收机安全无需换，芯片化可降成本
9	实际QKD系统有安全漏洞	漏洞研究都有应对方法，MDI/DI可期
10	拒绝服务（DoS）攻击	增加保护信道，采用离线存储密钥解决

来源：中国信息通信研究院根据论文整理 DOI: 10.1103/RevModPhys.92.025002

图 26 学术界对于 QKD 技术问题和质疑的回应

对于 QKD 科研层面问题，学术界多年以来已有大量研究成果和文献报道，前沿研究和实验探索也在蓬勃发展，科学家为我们指出的未来可期也绝非虚言。但同时也要看到，科研层面讨论的双场（TF）和测量设备无关（MDI）等新型协议系统和量子存储中继等技术，在短期内没有明确的商用化或实用化前景，并不能马上用于解决当前面临的工程和应用困难与问题。一方面，产业界不能以工程和应用存在问题来否定 QKD 领域的科学共识和科研成果；另一方面，学术界恐也难以科研论文的发表来回应工程和应用中面临的现实问题。

2. 工程层面

在 QKD 设备研发和部署的工程层面，当前 QKD 和量子保密通信系统的工程化现状主要是，商用 QKD 系统的现网光纤传输距离百公里以内，密钥成码率约为十 kbit/s 量级，系统设备工程化水平仍有较大提升空间。商用 QKD 网络基于可信中继节点实现 QKD 密钥存储管理，通过密钥路由和加密调度实现端到端密钥生成和提供。商用加密设备采用 QKD 密钥或中继密钥，结合国密/商密对称加密算法，实现传输信道加密，其中加密信道的业务容量可达 Gbit/s 量级。

量子保密通信系统和网络的工程化问题主要是，QKD 在协议设计层面，以牺牲信号传输的鲁棒性来换取密钥生成的安全性，这一特性对 QKD 系统性能指标和工程化水平的提升形成了制约。商用化 QKD 均采用制备-测量系统方案，发射机和接收机的现实安全性都需要进行进一步研究和验证，目前相关测评正在组织开展。商用 QKD 系统密钥速率有限，高速率等级通信业务难以采用“一次一密”加密，量子保密通信在整体系统层面难以达到信息论可证明安全性。QKD 网络可信中继节点的安全防护要求和相关标准规范目前尚未完全明确，“短板效应”降低了量子保密通信网络的整体安全性。

现阶段的商用 QKD 和量子保密通信系统，其工程化水平虽已达到“可用”，但距离“好用”仍有较大提升空间。进一步突破和解决系统与网络工程实践中面临的瓶颈问题，是 QKD 技术完成科学研究、实验开发、推广应用的三级跳，真正实现创新价值的必要前提和必由之路。目前，我国 QKD 示范应用项目和试验网络建设的数量和规模已

冠绝全球，下一步解决工程层面瓶颈问题更需产业公司“打铁自身硬”。此外，解决工程层面问题也需要量子物理、信息安全和网络通信等各方凝聚共识，形成合力，共同推动。

3. 应用层面

在 QKD 和量子保密通信应用和产业发展层面，基于 QKD 的量子保密通信在全球开展多项实验网络建设和试点应用，我国项目数量、网络建设和投资规模方面处于领先。包含基础研究、设备研制、网建运维、加密应用在内的量子保密通信产业链基本形成，但产业规模和发展速度较为有限。量子保密通信的应用探索已超过十年，主要发展模式为公共研究资金支持和政府类项目投入，市场化内生增长动力较弱，商用化推广成果较少，社会经济效益难言十分显著。量子保密通信在标准研制、型号准入和测评认证等方面的工作进展较为缓慢，也成为在高安全需求领域应用的瓶颈之一。

量子保密通信能够提升信息安全防护能力，在符合应用场景需求和管理准入条件的前提下，可在高安全需求领域的专用网络开展应用探索。量子保密通信的应用推广，需要破解在高安全需求领域“不敢用”和一般安全需求领域“用不起”的两难困境。量子保密通信产业化发展需要科研开发支撑、应用场景开拓、标准规范引导和测评认证保障等各方协同推动。基于当前的量子保密通信商用化解决方案，进行规模化网络建设的决策应根据应用场景的实际需求，广泛听取各方意见，充分论证稳妥实施。

四、量子测量领域研究与应用进展

（一）传感器产业发展迅猛，量子测量应用前景广泛

据相关行业资讯显示，与计算机和通信设备市场相比，传感器市场正逐渐成为规模更大和增长更快的市场。随着智能手机、车联网、物联网、工业互联网、远程医疗等新兴技术和应用的飞速发展，各类传感器，例如环境参数传感器、图像传感器、工业参数传感器、生物信息传感器和射频识别传感器等正逐步渗透到前端信息获取的诸多环节，并成为构建信息社会和推动数字经济发展的重要支撑。高精度、小型化和低成本是未来传感器发展的重要趋势，量子测量技术有望在提升测量精度、灵敏度、分辨率等方面超越现有技术方案，成为未来传感测量技术发展演进关注的重要方向。

在量子计算和量子通信等领域，人造微观量子体系的叠加态和相干性等状态容易受到外界环境的影响而发生改变，对其系统功能、性能和稳定性造成负面影响。与此相反，量子测量可以借助这些“缺点”，利用人造微观量子体系对环境物理量变化的超高敏感度特性，引发量子态的改变，从而实现对环境物理量的精密测量。



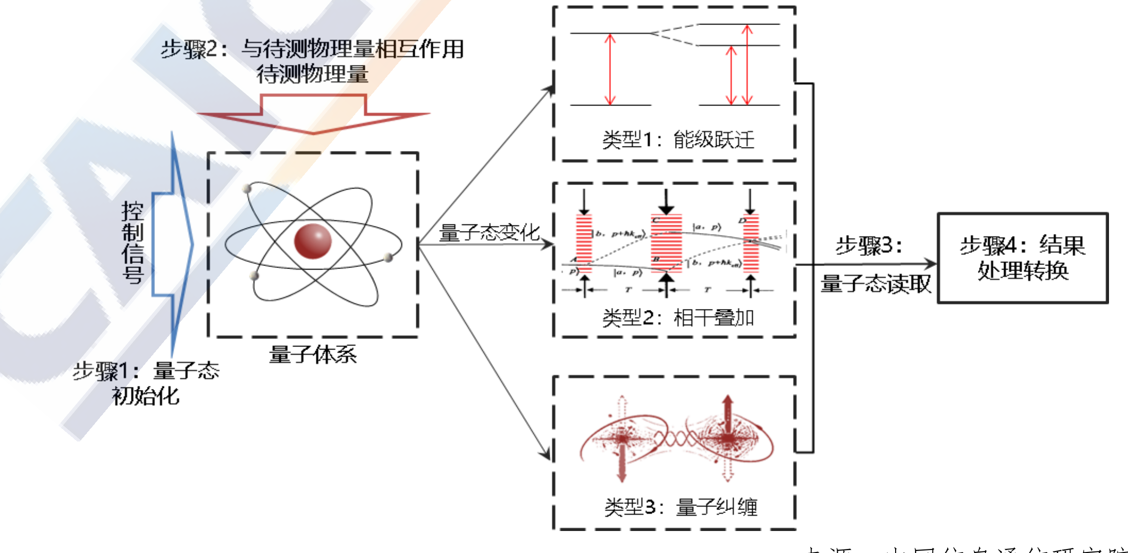
来源：中国信息通信研究院

图 27 量子测量技术主要应用领域和场景

经典测量存在难以突破的理论极限，比如电子仪器中的散粒噪声

极限，光学成像中的衍射极限等，经典测量向量子测量的演进将成为必然趋势。量子测量在许多特性方面具备优于经典方法的潜力，如尺寸、灵敏度、特异性、统计或系统不确定性、可追溯性、校准间隔、寿命、功耗和安全性等，未来能够激发和释放出全新的测量应用场景。量子测量技术在重力探测、高灵敏度成像、时频同步、定位导航、目标识别等诸多领域，如图 27 所示，具备广泛应用前景。

2018 年举办的第 26 届国际计量大会通过“修订国际单位制”决议，正式更新包括国际标准质量单位“千克”在内的 4 项基本单位定义。在 1967 年第 13 届国际计量大会上定义秒是“铯—133 原子在其基态两个超精细能级间跃迁时辐射周期所持续的时间”以来，到 2018 年计量中的 7 个基本单位已经有 6 个进行了量子化标定（除了“摩尔”）。量子常数化标定具备高可靠性和高可复现性优势，将国际单位建立在不变的物理常数之上，保证了其长期稳定性和环宇通用性。计量基准的量子参数化将进一步推动量子测量技术发展，未来将会对科学、技术、贸易、环境等诸多领域产生深远影响。



来源：中国信息通信研究院

图 28 量子测量的主要步骤和技术类型

量子测量可以视为是利用量子特性获得比经典测量系统更高性能的测量技术的总称。其具有两个基本技术特征，一是操控观测对象是人造微观粒子系统，二是系统与待测物理量之间的相互作用会导致量子态的变化。量子测量技术主要包括量子态初始化、与待测物理量相互作用、最终量子态的读取，结果处理等关键步骤，如图 28 所示。量子测量按照对量子特性的应用方式不同，可以分为三种技术类型：一是，用量子能级测量物理量，主要特征为具有分立能级结构。二是使用量子相干性或干涉演化进行物理量测量。三是，使用量子纠缠态和压缩态等独特量子特性来进一步提高测量精度或灵敏度。

量子测量的三种技术类型也对应了三个演进阶段。以在通信网络中广泛应用的原子钟为例，从 20 世纪 50 年代就开始研究的原子钟，采用原子的超精细能级间跃迁来进行时间标定，可为通信系统提供高精度授时和网络时间同步。由于原子在室温下热运动剧烈，相干时间短，原子间的碰撞和多普勒效应会导致频谱展宽，限制了时间测量的精度。冷原子钟运用激光冷却技术将原子团冷却至绝对零度附近，抑制原子热运动，利用泵浦激光进行选态，提高相干时间，利用原子能级间的相干叠加可以进一步提升时间测量精度。未来则可进一步研究利用纠缠构建量子时钟网络，利用原子间的纠缠特性进一步降低不确定度，从而突破经典极限。从分立能级到相干叠加再到量子纠缠，测量精度不断提升，代价是系统复杂度、体积和成本的增加。

（二）五大技术路线演进渐趋收敛，发展程度不均衡

通过对不同种类量子系统中独特的量子特性进行控制与检测，可以实现量子定位导航、量子重力测量、量子磁场测量、量子目标识别、量子时频同步等领域的精密测量。目前量子测量的五大主要技术路线包括基于冷原子相干叠加，基于核磁共振或顺磁共振，基于无自旋交换弛豫原子自旋（SERF），基于量子纠缠或压缩特性和基于量子增强技术。如图 29 所示为量子测量领域的五大技术路线与不同应用领域的国内外主要研究机构和行业企业布局分布情况。



来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理

图 29 量子测量五大技术路线国内外研究机构与企业布局

在五大技术路线的研发态势方面，冷原子技术路线近年逐渐“热”起来，其优势在于降低了与速度相关的频移，减速（或被囚禁）的原子可以被长时间观测，提高了测量精度，有望助力下一代定位导航授时技术的发展。原子自旋量子测量按照工作物质的不同可以分为基于核自旋（核磁共振）、电子自旋（顺磁共振）以及碱金属电子自旋与惰性气体核自旋耦合（SERF）的量子测量系统，广泛应用于陀螺仪、磁场测量领域。其测量精度较高，特别是基于 SERF 的量子测量具备

很高的理论精度极限，是目前另一个研究热点。量子纠缠是指两个或两个以上的复合量子系统的叠加状态，而不能简单分解为单个系统相干叠加态的直积形式。非纠缠态条件下，测量误差$\Delta \propto 1/\sqrt{N}\Delta \propto 1/\sqrt{\mathrm{N}}$，称为标准量子极限（SQL），而在纠缠条件下，测量误差可以接近海森堡极限，即$\Delta \propto 1/N$。将纠缠态应用于时钟同步、定位导航、目标识别领域，测量精度可以提高$\sqrt{N}$倍，突破经典物理的限制，逼近海森堡极限。光场在某个维度上的测量方差小于1则称为处于压缩态，常见压缩态包括正交振幅压缩态和正交相位压缩态。压缩光由于在某一个维度上进行压缩，也使得分量测量误差小于 SQL，提高测量精度。压缩态应用在目标成像、识别、相位估计等领域。由于非经典态产生十分困难，并且光的量子特性在有损耗的环境中极容易受到破坏，实际应用中存在一定困难，目前主要理论分析或原理样机开发阶段。量子增强技术在发射端未使用量子纠缠源或压缩光，而在接收端利用量子技术进行测量增强，比如利用单光子探测和频率上转换等技术提升探测灵敏度，接收端进行压缩光场注入和相敏放大提升信噪比等，主要应用在量子目标识别和成像等领域。

在五大技术路线的实用化进展方面，基于量子纠缠的量子测量技术理论精度最高，可以突破经典物理的限制，但是其技术成熟度较低，受限于量子纠缠源制备、远距离分发、量子中继等技术，目前多为理论验证或原理样机开发，实用化前景不明确。基于冷原子的量子测量技术理论精度较高，由于激光冷却、磁光阱等系统的存在，体积较大成本也较高。目前一些小型化冷原子测量样机实验研究，通过 MEMS

技术将电场、磁场和光场测量进行集成，可实现芯片级的原子囚禁、冷却、导引、分束等操控，但是相干时间较短。例如，美国 ColdQuanta 公司已提供商用化原子芯片产品；2019 年华中科大报道了新型量子重力 MEMS 芯片，尺寸为 $25\times25\times0.4mm^3$；2020 年英国伯明翰大学报道用于产生冷原子的介电超表面光学芯片，尺寸为 $599.4\times599.4\mu m^2$，并基于芯片获得约 107 个冷原子，冷却温度需低至 35μK，但应用条件较为苛刻，多面向高端基础科研等应用场景。基于 SERF 原理的量子测量技术精度较高，目前研究机构多聚焦于在提升磁场和角速度测量精度，而企业开始研发小型化 SERF 磁力计，探索心磁和脑磁测量等应用领域。基于核磁共振的测量虽然精度不如冷原子及 SERF，但是技术相对成熟，已有小型化和芯片化商用产品。基于量子增强的测量技术是经典测量与量子技术融合的产物，采用量子技术对经典测量的精度进行提升，技术相对成熟，在目标识别领域应用前景广泛。

（三）国内外科研取得新进展，我国仍然有一定差距

近年来，量子测量技术主要研究关注提升测量性能指标，进一步挑战测量精度记录和突破经典测量极限；推进样机系统工程化，进一步开展小型化、芯片化和可移动化研发，增强系统实用性。近年来国内外量子测量各领域在高精度和工程化方面研究的主要成果与进展如图 30 所示。其中代表性成果包括，2019 年美国 NIST 报道 Al+离子光钟不确定度指标进入 10^{-19} 量级，进一步刷新世界纪录；2019 年中科大报道实现金刚石 NV 色心 50 纳米空间分辨率的高精度多功能量子探测；2019 年美国加州大学报道实现可移动式高灵敏度原子干

涉重力仪和毫米级原子核磁共振陀螺仪芯片等。

领域	近期国内外量子测量技术与应用研究代表性进展
量子时间基准	• 2018年美国NIST报道Yb原子光晶格钟不确定度达1.4e-18，2019年Al+光时钟不确定度为9.4e-19量级，保持光钟精度世界纪录。 • 2019年美国NIST报道芯片级原子钟，其蒸汽室体积仅为10×10×3 mm，功耗约为275mW，不确定度达到1e-13量级。 • 2019年美国加州理工团队提出一种单原子读出的原子阵列时钟，兼顾离子钟和光晶格钟的优势，精度可达10e-15量级。 • 2018年武汉数物所40Ca+光钟不确定度1e-17量级，与国际先进成果相差1~2数量级。 • 2020年中科大“墨子号”星地量子安全时间传递达30 ps精度。 • 2020年美国NIST报道了将光钟输出转换到微波波段，并保证其不确定度优于10e-18量级
量子磁场测量	• 2019年美国MIT：硅芯片金刚石色心量子传感器，实现对磁场的精密测量，实现自旋量子位测量系统和CMOS技术结合。 • 2019年中科大实现基于金刚石色心的50纳米空间分辨率高精度多功能量子传感，，将应用于微纳电磁场及光电子芯片的检测。 • 2019年science发表三篇关于金刚石量子传感器在高压物理研究应用的文章，来自加州大学、香港中文大学、巴黎萨克莱大学。 • 2020年北航等团队合作开发原子自旋SERF效应超高灵敏磁场测量平台灵敏度达到0.089 fT/Hz1/2@30~39Hz，指标高于国外公开报道。 • 2020年航天33所研制小型化SERF磁强计灵敏度约为10fT/Hz1/2，探头面积为1.25×1.25cm2，并完成8通道脑磁探测。
量子重力测量	• 2018年加利福尼亚大学报道了可移动原子干涉重力仪，结构简单，方便运输与组装，同时灵敏度可达到37μGal/$\sqrt{Hz}$。 • 2020年浙江工大研制的小型化可移动原子干涉重力仪在车载倾斜路况下测量精度达30μGal，船载条件下实现测量精度小于1mGal 。
量子定位导航	• 近年来，加州大学欧文分校一直致力于微型核磁共振陀螺仪研究，2018年报道了可以批量生产微型核磁共振陀螺仪元件的方法。 • 2018年北京航天控制仪器研究所研制的SERF陀螺样机稳定性优于8°/h，体积为3000cm3 • 2020年北航等团队合作开发原子自旋SERF效应超高灵敏惯性测量平台，灵敏度达到6.8E-8o/s/Hz1/2@85~94Hz，高于国外公开报道。
量子目标识别	• 近年来，伦敦大学、乌尔姆大学、苏黎世理工等多家研究机构实现微波波段的单光子和纠缠源的产生及检测，有望用于量子雷达。 • 2020年奥地利科学技术学院实验证明微波波段的量子照明，以照亮距离为1米的室温物体。与经典雷达相比，信噪比提高三倍。 • 2020年中电14所与南京大学联合报道超导阵列单光子探测器雷达系统外场测试，实现对数百公里外移动和固定小目标实时跟踪探测。

来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理

图 30 近期国内外量子测量技术与应用研究代表性进展

在量子测量部分领域的高性能指标样机研制方面，我国已基本赶上或达到国际先进水平。中国计量院研制并正在优化的 NIM6 铯喷泉钟指标与世界先进水平基本处于同一数量级；中科大在《科学》杂志报道基于金刚石 NV 色心的蛋白质磁共振探针，首次实现单个蛋白质分子磁共振频谱探测；2020 年北航、华东师范和山西大学等联合团队研制完成基于原子自旋 SERF 效应的超高灵敏惯性测量平台和磁场测量平台，其灵敏度指标达到国际先进水平。但也应该看到，在量子测量的很多领域，我国技术研究和样机研制与国际先进水平仍有较大的差距。在光钟的前沿研究方面，我国样机精度指标与国际先进水平相差两个数量级；我国核磁共振陀螺样机在体积和精度方面都存在一定差距；量子目标识别研究和系统化集成仍有差距；微波波段量子探测技术研究与国际领先水平差距较大；量子重力仪方面性能指标接近，在工程化和小型化产品研制方面仍处于起步阶段。

在量子测量的数据后处理方面，引入人工智能算法进行处理超能

力提升，正成为一个新兴研究方向。量子测量采用原子或者光子级别的载体作为测量“探针”，其信号强度弱，易淹没在噪声当中。例如在常规核磁共振系统中，相干时间、磁噪声、控制器噪声和扩散诱导噪声等几乎可以忽略不计，但对于金刚石 NV 色心纳米级核磁共振探针而言，噪声影响明显，并且噪声理论模式复杂难以通过信号处理补偿或抑制，需要很复杂的噪声屏蔽装置和精确的操控系统才能获得理想信噪比。又如基于原子的相干测量系统，原子热运动和相互碰撞导致能级谱线展宽，使得谱线测量精度下降，需要引入激光冷却和磁光阱等方式制备冷原子，降低噪声影响获得高信噪比，引入复杂控制系统或屏蔽装置，不利于测量系统小型化和实用化。

人工智能算法适合解决模型复杂、参数未知的数学问题，无需事先预知噪声数学模型，可通过算法迭代学习寻求答案或者近似答案。通过将量子测量与人工智能技术相结合，提升数据后处理能力，可有效降低噪声抑制要求，简化系统设计，提升实用化水平。2019 年英国布里斯托尔大学报道将机器学习算法引入金刚石 NV 色心磁力计数据处理，无需低温条件获得相近的测量精度，提升单自旋量子位传感器实用性。2019 年以色列耶路撒冷希伯来大学报道通过深度学习算法增强金刚石 NV 色心纳米核磁共振系统性能。2020 年美国麻省理工报道利用机器学习算法提升量子态读取性能的通用化方法。

将量子测量技术与经典测量技术相结合也可以改善量子测量系统的性能指标。基于冷原子的量子测量系统的优势在于测量精度高，但是动态范围小，而传统经典测量技术相比较而言测量范围比较大，

二者相结合有益于取长补短。2018 年法国航空航天局报道通过将冷原子加速度计与强制平衡加速度计相结合将测量范围扩大了三个数量级。同期清华大学报道将经典白光干涉仪的研究思路与原子干涉陀螺仪相结合，大幅度提升了角速度测量的动态范围。

目前大部分基于纠缠的量子测量研究都关注在本地将探针信号与参考信号纠缠在单个传感器上进行测量，但未来很多应用场景可能借助多个传感器共同完成测量任务。理论分析证明，将分布式量子传感器互连形成基于纠缠的量子传感器网络（QSN），可使测量精度突破标准量子极限（SQL）。目前基于离散变量(DV)和连续变量(CV)纠缠的分布式量子传感理论框架已被提出。DV-QSN 采用纠缠在一起的离散光子或者原子作为测量单元，典型应用为纠缠的量子时钟网络，先将每个时钟节点内的原子纠缠，在通过量子隐形传态技术将所有的时钟节点之间纠缠态的传递，实现全局纠缠，进行 Ramsey 干涉可实现全局的频率同步，可采用 QKD、随机相位调制、中心点轮换等方式抵御各种安全攻击，从而实现安全和高精度的同步时钟网络。CV-QSN 采用纠缠压缩光信号作为测量单元，一般适用于振幅、相位检测或量子成像。2020 年美国亚利桑那大学报道采用 CV-QSN 进行压缩真空态相位测量，测量方差可以比 SQL 低 3.2dB。未来有望在超灵敏定位、导航和定时领域探索应用。

值得一提的是，采用量子纠缠的 QSN 组网是否一定能提升测量精度也是学术界关注的问题。理论研究表明，对于多参数全局评估，纠缠 QSN 有助于测量精度提升，并可以突破 SQL，例如测量全局变

量的平均值$\bar{p}=\sum_{m=1}^{M} v_m p_m$等场景。但对单一参数测量或者局部测量时，纠缠特性并不能提升测量精度。此外，QSN 的核心使能技术如高品质纠缠态制备、远距离纠缠分发和量子中继等尚不成熟，距离实用化和工程化较远，仍需要大量理论研究和实验探索。

（四）欧美应用与产业化发展迅速，我国正逐步发力

在量子测量领域，欧美多家公司已推出基于冷原子的重力仪、频率基准（时钟）、加速度计、陀螺仪等商用化产品，同时积极开展包括量子计算在内的新兴领域研究和产品开发，产业化发展较为迅速。代表性量子传感测量企业包括：美国 AOSense 公司作为创新型原子光学传感器制造商，专注于高精度导航，时间和频率标准以及重力测量研究，主要产品包括商用紧凑型量子重力仪、冷原子频率基准等，与国家航空航天局（NASA）等机构展开研究合作。美国 Quspin 公司 2013 年研制小型化 SERF 原子磁力计，2019 年推出第二代产品，探头体积达到 5cm3,进一步向脑磁探测阵列系统发展。美国 Geometrics 公司致力于地震仪和原子磁力计的研发，已推出多款陆基和机载地磁测量产品。法国 Muquans 公司在量子惯性传感，高性能时间和频率应用以及先进激光解决方案领域开发广泛产品线，主要产品包括绝对量子重力仪、冷原子频率基准等，2020 年开始进行量子计算处理器研发。英国 M Squared Lasers 公司，开发用于重力，加速度和旋转的惯性传感器以及量子定时装置，主要产品包括量子加速度计、量子重力仪和光晶格钟等，还涉足中性原子和离子的量子计算机研发。

我国量子测量应用与产业化尚处于起步阶段，落后于欧美国家。

较为成熟的量子测量产品主要集中于量子时频同步领域，成都天奥从事时间频率产品、北斗卫星应用产品的研发，主要产品为原子钟。此外，中电科、航天科技、航天科工和中船重工集团下属的一些研究机构正逐步在各自优势领域开展量子测量方向研究。

近年来，高校和研究机构对于科研成果的商业转化支持力度逐步增大。源于中科大的国耀量子将量子增强技术应用于激光雷达，面向环境保护、数字气象、航空安全、智慧城市等应用，生产高性价比的量子探测激光雷达。国仪量子以量子精密测量为核心技术，提供以增强型量子传感器为代表的核心关键器件和用于分析测试的科学仪器装备，主要产品包括电子顺磁共振谱仪、量子态控制与读出系统、量子钻石原子力显微镜、量子钻石单自旋谱仪等。科大国盾近年针对高精度重力测量需求，开发出基于冷原子干涉的重力仪原型产品。浙江工业大学历时 15 年开展小型化原子重力仪研究，于 2019 年开发出第三代系统样机，后续计划逐步推进商业化和应用落地。

随着量子测量技术逐步演进，全球量子传感测量企业不断推出成熟的商业化产品。目前在防务装备研制、能源地质勘测、基础科研设备等领域的应用和市场比较明确，未来可能在生物医疗、航空航天、信息通信和智慧交通等更多领域探索应用市场。但量子态制备、保持、操控、读取等关键技术和产品实用化研发等方面仍存在挑战。近年来，量子测量领域的技术投资逐步增加，美国国防部高级研究计划局（DARPA）为小企业创新研究和小企业技术转让设立专门项目资助，支持包括量子测量技术在内的多个技术领域。

此外，全球量子传感器市场和产业增长越来越多的由合作伙伴联合推动，系统设备商正在与供应商、研究机构等建立合作伙伴关系，使市场参与者能够利用彼此的技术专长联合推动产品开发。如卡塔尔环境与能源研究所与日本国际材料纳米建筑中心合作开发多种纳米电子器件、量子传感器。

（五）标准化开始初步探索，基础材料器件至关重要

量子测量存在众多技术方向和应用领域，其中的术语定义、指标体系、测试方法存在较大差异性，进行标准化研究和探讨将有助于应用开发、测试验证和产业推动。对于已经进入样机或初步实用化的技术领域，开展总体技术要求、评价体系、测试方法和组件接口等方面的标准化研究工作有一定必要性。目前，国际和国内多个标准化组织在量子测量领域正在开展初步标准化研究与探索。2018 年，IETF 启动量子互联网研究组，研究量子互联网应用案例，目前包含量子传感应用方面量子时钟网络和纠缠量子传感网络测量微波频率两个用例。2019 年，ITU-T 成立面向网络的量子信息技术焦点组（FG-QIT4N），从术语定义、应用案例、网络影响、成熟度等维度对量子信息技术进行研究，量子时频同步方面提交文稿 12 篇，均被接受并纳入研究报告。CCSA-ST7 在量子信息处理工作组（WG2）立项研究课题《量子时间同步技术的演进及其在通讯网络中的应用研究》，开展量子时间同步技术研究。2020 年，TC578 立项研究课题《超高灵敏原子惯性计量测试标准研究》，开展量子惯性测量测试方法研究。目前，量子测量标准化研究主要集中在术语定义、应用模式、技术演进等早期预研

阶段，标准体系尚未建立，企业参与度不高。

量子测量领域开展标准化研究的建议包括：一是，对标准化体系建设进行布局，加快对整体技术要求、关键定义术语、指标评价体系、科学测试方法等方面的标准化工作。二是，发挥企业在标准制定中的推动作用，支持组建重点领域标准推进联盟或焦点组，协同产品研发与标准制定。三是，鼓励和支持企业、科研院所、行业组织等参与国际标准话讨论，提升我国研究机构和产业公司国际标准研究参与度。

我国量子测量的系统和分系统级别的核心组件主要基于自主研发，但设计和研制样机所需的基础材料和元器件，以及高端测控仪表等仍然有很大一部分需要依赖进口。

量子测量领域在基础材料、关键器件和加工工艺等方面加强研发布局的建议包括：一是，梳理涉及重要领域瓶颈的关键技术，集中精力，联合优势单位进行攻关。二是，对于专注基础研究，达到甚至赶超国际先进单点技术，解决“卡脖子”问题的科研人员应该给予项目经费和评价体系等方面鼓励引导。三是，弘扬“大国工匠”精神，提升基础加工制造工艺水平，实现材料元件和器件自主研发和加工制造。

五、量子信息技术演进与应用前景展望

（一）三大领域研究与应用探索发展迅速，前景可期

量子信息技术的研究与应用将为基础科学研究、信息通信发展、社会经济建设等领域的升级和演进注入新动能，已成为全球科技领域的关注焦点之一，近年来发展正逐步加速，世界各国进一步布局规划

加大投入支持力度。量子信息三大领域的研究和应用探索进一步加速，标志性成果和热点话题层出不穷，技术演进和应用发展趋势正逐步明晰。量子计算、量子通信和量子测量三大领域的基本原理特性，技术发展与应用定位，以及在未来五年左右的近期和十年以上的远期发展应用前景预测如图 31 所示。

	量子计算	量子通信	量子测量
原理特性	■ 以**量子比特**为基本单元，利用量子叠加和干涉等原理实现并行计算，**在某些计算困难问题上可能提供指数级加速。**	■ 利用**叠加态及纠缠效应**，在经典通信辅助下，进行量子态信息传输或密钥分配，具有无法被窃听的**信息论安全性保证。**	■ 基于对光子和冷原子等**微观粒子系统**的调控和观测，实现对时间、磁场、重力场等多种物理量信息的**超高精度测量。**
发展定位	➢ 为计算困难问题提供高效解决方案，实现突破经典计算极限的**算力飞跃。**量子计算与经典计算**长期并存，相辅相成。**	➢ 连接量子信息处理节点构成**量子信息网络**；量子密钥分发服务于**经典通信加密。**量子通信与经典通信**应用场景不同。**	➢ 实现物理量测量和信息获取的精度、分辨率、稳定度等性能指标**进一步提升。**经典测量到量子测量是**发展必然趋势。**
应用前景	● **~5年：**基于含噪声中等规模量子处理器（NISQ）和云平台探索具备实用化价值的应用算例。 ● **远期：**大规模可编程容错量子计算机及其应用。	● **~5年：**量子信息网络关键技术突破，实验网络和标准体系建设；量子保密通信商用化探索。 ● **远期：**量子通信与量子计算融合形成量子信息网络。	● **~5年：**新一代定位、导航和授时系统，微弱磁场和重力场测量系统，高灵敏度成像系统。 ● **远期：**小型化和商用化量子测量系统和量子传感器。

来源：中国信息通信研究院

图 31 量子信息三大领域的原理特性、发展定位及应用前景

量子计算领域，近期研究与应用探索成果亮点纷呈，已成为各方关注与讨论的焦点。量子计算硬件物理平台各技术路线的比特数和量子体积等指标频频刷新纪录，系统工作条件和测控能力等方面的研究不断深入和提升。量子计算算法和应用探索不断深入，在量子化学、组合优化、复杂网络排序等方面的探索可能率先诞生"杀手级"应用。量子计算软件系统研究取得较大进展，量子云计算应用和产业生态建设加速发展，科技巨头相互竞争态势更加明显。同时也需要看到，量子计算物理平台的技术路线仍处于并行发展状态，超导和离子阱技术路线目前受到更多关注，光量子、半导体和拓扑等技术路线也具有很

大潜力，但仍未出现技术路线收敛或融合的趋势，实现量子逻辑比特的门槛尚未跨越。在软件算法和应用探索方面，系统架构和软件系统仍处于新构阶段，真正能够在具有实际应用价值的计算困难问题中，获得超越经典计算优势的量子计算实用案例尚未明确。量子计算测控系统和工作环境等方面要求仍然十分严苛，实现可容错可扩展通用量子计算仍是超过十年以上的远期目标。未来数年，如果基于 NISQ 的实用化问题应用探索取得突破，则可以维持目前量子计算技术研究和关注的热度并进一步冲击更高目标，但如果实用化问题应用探索迟迟无法取得突破性进展，则可能进入过高期望破灭的发展低谷期。

量子通信领域，基于 QT 构建量子信息网络已经成为未来研究与应用探索发展关注的重点方向，近期国外加大投资布局和推动力度，计划开展基础组件研发、系统集成开发、网络组网试验、协议架构标准研究等方面工作，未来数年可能在原理样机研发、原型网络试验和协议标准推动等方面率先取得进展。基于 QKD 的量子保密通信技术科学研究保持活跃，应用和产业化持续探索，在商用化解决方案、测评验证、示范应用和标准研究等方面取得进展，但各方对 QKD 应用前景的观点尚未统一，近期国外机构发布报告普遍对 QKD 大规模应用持谨慎态度。我国 QKD 应用探索和产业发展取得一定成果，但仍面临系统性能与实用化水平待提升，应用场景和市场化发展程度有限，产业内生增长动力不足等问题瓶颈，需产学研用各界进一步凝聚共识、明确定位、协同研讨、合力破解相关难题。发展趋势方面，量子信息网络研究和应用探索仍然处于起步阶段，距离实用化还有很长距离，

短期内的原理样机与实验网络可能仅支持小规模原理性验证和部分初级应用。QKD 网络研究和应用探索也将持续进行，未来向量子信息网络的发展演进趋势需进一步观察。

量子测量领域，测量传感领域的市场规模和产业前景极具潜力，量子测量作为传感测量技术的未来发展演进必然趋势，在时间基准、惯性测量、重力测量、磁场测量和目标识别等领域已经形成较为明确的研究方向，在原子相干叠加测量、核磁/顺磁共振测量、无自旋交换弛豫原子自旋（SERF）测量、纠缠态/压缩态测量和量子增强测量等技术方向的研究和演进也逐步趋向明晰收敛。近期国内外在提升测量传感性能指标和推进样机系统工程化研究等方面取得一系列新成果，同时也在人工智能辅助数据后处理，构建量子传感网络等新兴研究方向进行了初步探索。在量子测量部分领域的高性能指标样机研制方面，我国基本赶上或达到国际先进水平，但在其他更多领域，我国与国际先进水平仍有较大差距。欧美多家公司已推出量子测量相关商用产品，产业化发展较为迅速，我国量子测量应用与产业化尚处于起步阶段，同时在核心基础原材料、器件和高性能测控系统等方面仍有一些短板。发展趋势方面，量子测量技术未来数年有可能在新一代定位、导航和授时系统，微弱磁场和重力场高灵敏度监测系统和高精度目标识别成像系统等方向率先获得突破和应用。

（二）我国总体发展态势良好，未来有望进一步加速

在量子信息领域的国际发展态势方面，美国在政策布局、资金支持、科研环境、顶尖人才、科技巨头、创业公司和产业生态等方面占

据领先优势。在量子计算样机研发和应用探索方面进一步加大推动力度，重点关注和规划量子互联网等前沿方向，量子测量各领域应用和产业化发展迅速。此外，美国通过与盟友间的项目合作、人才交流和投资并购等方式，在研发、应用、产业和标准等方面构建联盟优势。

我国量子信息技术研究和发展一直受到国家层面的重视和支持，相关科技项目、样机研发和试点应用的布局和投入逐步增加。在国家重视投入和高校、科研机构和产业公司的科技工作者的共同努力下，我国量子信息领域的科研与应用探索近年来取得了诸多重要成果。总体而言，我国量子通信领域科研与国际水平基本保持同步，星地量子通信研究和示范应用探索处于领先；量子计算领域的前沿研究、样机研制和应用推广与欧美存在较大差距；量子测量领域的商用化和产业化仍有一定差距。我国在量子信息领域科研团队、研究人员和论文专利数量，知识产权布局和标准体系建设等方面具备较好的实践基础和发展条件，成为推动全球量子信息技术发展的重要力量之一。

我国在重大项目组织协调方面具备集中力量办大事的体制优势，快速发展的经济水平，较为完备的工业体系和体量庞大的统一市场能够为量子信息技术的快速应用和产业发展提供有力支撑。此外，量子信息技术研究和应用发展仍具有明显的长期性和不确定性，技术壁垒和产业垄断暂未形成，准确把握机遇，凝聚各方共识，聚力加快发展，有望实现与国际先进水平的并跑领跑。2020 年 10 月，习近平总书记对我国量子科技研究和应用做出重要指示，为量子信息技术领域发展面临的一系列重要问题进一步指明了方向。产学研用各界深入学习领

会和贯彻落实习近平总书记的重要指示精神，有望进一步加快推进我国量子信息技术研究、应用探索和产业发展。

我国量子信息技术领域发展总体态势良好，未来进一步促进研究与应用发展的主要关注点包括：一是，研判发展演进趋势，制定长期发展规划。准确分析量子信息各领域技术演进趋势与应用产业前景，制定整体发展战略规划，明确近期和中长期发展目标，分阶段投入和考核。二是，重视核心基础组件，提升自主研发水平。加大突破共性关键技术，掌握核心基础组件类项目布局和支持力度，提升器件和系统层面自主研发和工程化集成能力。三是，补齐配套体系短板，强化应用产业研究。补齐基础材料样品、加工制造工艺、测控环境仪表、算法软件设计等配套体系短板，开展实验网络、标准体系和测评认证等应用研究。四是，布局基础学科建设，加强人才引进培养。设置量子信息相关学科和专业，强化后备人才培养，优化考核评价体系，激发创新创业活力。

附录：缩略语

BSM （Bell State Measurement） 贝尔态测量
CNOT （Controlled NOT gate） 受控非逻辑门
CV-QKD （Continuous Variable QKD） 连续变量量子密钥分发
DV-QKD （Discrete Variable QKD） 离散变量量子密钥分发
GUI （Graphical User Interface）图形用户界面
MDI-QKD（Measurement Device Independent QKD） 测量设备无关量子密钥分发
MEMS （Micro Electro Mechanical Systems） 微机电系统
NISQ （Noisy Intermediate-Scale Quantum） 中等规模含噪声量子处理器
NV Center（Nitrogen-Vacancy Center） 金刚石氮空位色心
PQC （Post-Quantum Cryptography） 抗量子计算破解加密算法，也称量子安全密码或后量子密码
QAOA （Quantum Approximate Optimization Algorithm） 量子近似优化算法
QIN （Quantum Information Network） 量子信息网络，也称量子互联网
QKD （Quantum Key Distribution） 量子密钥分发
QRNG （Quantum Random Numbers Generator） 量子随机数发生器
QSN （Quantum Senor Network） 量子传感器网络
QT （Quantum Teleportation） 量子隐形传态
Qubit （Quantum Bit） 量子位，量子信息处理的最小信息单位
SDK （Software Development Kit） 软件开发工具包
SERF （Spin Exchange Relaxation Free） 无自旋交换弛豫原子自旋
SNSPD （Superconducting Nanowire Single Photon Detector） 超导纳米线单光子探测器
SQL （Standard Quantum Limit）标准量子极限
TF-QKD （Twin Field QKD） 双场量子密钥分发
VQE （Variational Quantum Eigensolver） 可变量子本征求解



中国信息通信研究院

地址：北京市海淀区花园北路 52 号

邮政编码：100191

联系电话：010-62300592

传真：010-62304980

网址：www.caict.ac.cn

